JULIÁN ANTONIO VILLAMARÍN MUÑOZ

**ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS EM UMA
MISTURA DE LÍQUIDOS IMISCÍVEIS DURANTE O PROCESSO DE
SEPARAÇÃO DE FASES**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interunidades em Bioengenharia - Escola de Engenharia de São Carlos / Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto / Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Bioengenharia.

Área de concentração: Bioengenharia

Processamento de Sinais e Instrumentação.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Dias Maciel

São Carlos

2007

Dedico

Aos meus pais por seu grande apoio incondicional e por serem meu exemplo e inspiração para seguir adiante tentando ser hoje melhor que ontem.

AGRADEÇO:

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Dias Maciel pelos conhecimentos transmitidos, incentivo e paciência neste trabalho.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro através da bolsa de mestrado.

Ao Prof. Paulo Seleglim pelo empréstimo dos equipamentos e transdutor de Ultra-som.

Ao pessoal do laboratório (LIM) que fizeram uma companhia agradável durante o tempo de desenvolvimento deste trabalho.

A Pilar Anzola por seu apoio incondicional que dia a dia me inspirou para seguir adiante.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram com este trabalho.

*“Vivir no es sólo existir, / sino existir y crear, / saber gozar y sufrir / no
dormir sin soñar. / Descansar, es empezar a morir..”*

Gregorio Marañón

VILLAMARÍN, Julián (2007). **Estimativa dos parâmetros acústicos em uma mistura de líquidos imiscíveis durante o processo de separação de fases.** 103f. Programa de Pós-Graduação Interunidades em Bioengenharia – EESC/FMRP/IQSC da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Esta pesquisa estuda a evolução temporal dos parâmetros de propagação acústica de uma mistura de líquidos imiscíveis considerada como emulsão instável durante o processo de separação de suas fases. O principal objetivo neste trabalho é estudar o comportamento não linear de materiais que variam sua não homogeneidade quando são submetidos a um campo acústico. O estudo é baseado na teoria de análise espectral de ecos de ultra-som para entender o processo físico de interação da onda – emulsão. A emulsão bifásica que tem sido analisada neste estudo é composta principalmente por um óleo mineral A e um óleo vegetal B. A metodologia é baseada na análise tempo frequência de ecos e sinais de *backscattering* de ultra-som com uma frequência central de 5MHz e uma largura de banda de 8MHz @ - 3dB. A velocidade média de propagação acústica para a mistura líquida foi estimada em 1354 m/s. O coeficiente de atenuação foi calculado para cada fase separada e se obtiveram os seguintes resultados: 0.82 dB/cm - MHz para o óleo A e 0.59 dB/cm - MHz para o óleo B. O parâmetro B/A avaliado para cada fase separada foi de: 8.43 para óleo A e 10.74 para o óleo B. A variação dos parâmetros acústicos descreveram a evolução da emulsão no tempo mediante o decremento das curvas de atenuação, B/A e IBC. A velocidade de propagação não forneceu informações relevantes a respeito do processo de separação das fases, devido a sua variação mínima. A percentagem média de variação dos parâmetros acústicos durante o processo dinâmico de separação das fases da emulsão foi de 1.39% para a velocidade de propagação, 46.9 para β e 51% para B/A. Espera-se que o estudo possa ser extrapolado para o melhor entendimento da interação de ondas de ultra-som em meios não homogêneos e variantes no tempo.

Palavras-Chave: Análise Espectral, Emulsão Bifásica, Evolução Temporal Parâmetros Acústicos, Processo de Separação das Fases.

ABSTRACT

VILLAMARÍN, Julián (2007). **Acoustic Parameters estimative for a mixture of immiscible liquids during its dynamic phases separation process.** 103f. Programa de Pós-Graduação Interunidades em Bioengenharia – EESC/FMRP/IQSC da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

This research studies the time evolution of acoustic propagation parameters of a mixture of immiscible liquids considered as unstable emulsion during the separation process into its original phases. The main aspect of this work is to deal with the behavior of nonlinear, nonhomogeneous and time-varying media when they are submitted in an acoustic field. The study is based on spectral analysis theory of ultrasound-backscattered echoes for understanding of physical process of the wave-emulsion interaction. The biphasic emulsion, which has been analyzed during this study, is composed by a mineral oil (phase A) and vegetable oil (phase B). The methodology was based on time-frequency analysis of backscattered broadband ultrasound echo at center frequency of 5 MHz and bandwidth of 8 MHz @ -3dB using an ultrasound system in pulse-echo mode. The mean acoustic propagation velocity for the mixture liquid was estimated in 1354 m/s. The attenuation coefficients were calculated for each separated phase resulting in 0.82 dB/cm-MHz to phase A and 0.59 dB/cm-MHz to phase B. The B/A parameter have been evaluated resulting in 8.43 (phase A) and 10.74 (phase B). The acoustic parameters variation allowed identified different emulsification state inside emulsion. The time evolution for the emulsion was described through the decrease of attenuation, B/A and IBC. The acoustic propagation velocity don't provide relevant information about the phases separation process, because it showed a minimal variation. The mean percentage variation for the time evolution of the acoustic parameters was 1.39% to the acoustic propagation velocity, 46.9% to β and 51% to B/A. We hope that observations can be extrapolated aiming a better understanding of ultrasonic waves interaction in non-homogeneous time-varying medium.

Keywords: Acoustic Parameters, Biphasic Emulsion, Inverse Emulsification Process, Spectral Analysis, Temporal Evolution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Etapas de uma emulsão bifásica instável: a) Duas substâncias Imiscíveis separadas em duas fases. b) Emulsão das substâncias. c) Separação das fases Emulsão instável retorna ao seu estado natural.	30
Figura 2: Janelas freqüentemente usadas para proporcionar um melhor ajuste na dualidade tempo – freqüência. M é uma constante de tempo.	33
Figura 3: Espectrograma. Fonte: Adaptado de MathWorks, Inc.(2004).	34
Figura 4: Movimento das partículas de um meio para ondas longitudinais e transversais. Adaptado Nota Técnica Panametrics.....	36
Figura 5: Técnica de inserção para estimativa experimental da velocidade de propagação. Fonte adaptada de DUCK <i>et al.</i> (1998).	42
Figura 6: Método de Diferença Espectral para estimativa da atenuação. Fonte: Adaptado de SHUNG et al.(1993).	45
Figura 7: Espalhamento do sinal de ultra-som produzido por uma partícula de dispersão de um meio não homogêneo.	49
Figura 8: Transdutor Emissor - Receptor de Ultra-som. a) Vista frontal. B) vista lateral.....	54
Figura 9: Equipamento de Ultra-som.....	54
Figura 10: Refletor cilíndrico de alumínio.	54
Figura 11: Tanque acústico.	55
Figura 12: Óleo bifásico.	55
Figura 13: Sistema utilizado para a captura do sinal de ultra-som ao interagir com a emulsão.....	56
Figura 14: a) Captura do sinal de ultra-som na água (meio Referência). b) Captura do Sinal de ultra-som na amostra de óleo Bifásico.....	57
Figura 15: Sinal de ultra-som de referência obtida durante a propagação na água. .	57
Figura 16: Estabilização das fases da emulsão ao longo do tempo.....	58
Figura 17: (a)-(g): Tamanhos das Gotículas de óleo vistas na região de interesse	

LISTA DE FIGURAS

(ROI) durante o processo de separação das fases da emulsão.....	60
Figura 18: Trecho do sinal de ultra-som na ROI visto durante os primeiros instantes do meio emulsificado.....	62
Figura 19: Ecos de ultra-som refletidos desde o óleo bifásico com suas fases estáveis.	62
Figura 20: Reflexões de ultra-som no óleo bifásico.....	63
Figura 21: a) Sinal de Referência; b) Espectro de Potência de Referência	64
Figura 22: Redução da frequência central produzido pela atenuação	65
Figura 23: Ajuste linear para a atenuação.....	66
Figura 24: Identificação do segundo harmônico $P2_{xref}$ e $P2_x$ para o espectro de Referência $S_{ref}(x, f)$ e o espectro atenuado $S(x, f)$ na ROI do óleo bifásico respectivamente.	67
Figura 25: Recipientes de alumínio contendo cada fase de óleo bifásico. a) óleo A. b) Óleo B	68
Figura 26: Sinal de ultra-som refletido pelo óleo A.....	69
Figura 27 : Segmentação do sinal de <i>backscattering</i> para a estimativa da média espectral usada no cálculo do BSC e IBC.....	70
Figura 28: Estrutura básica da sub-rotina para a estimativa dos parâmetros acústicos.	71
Figura 29: Espectrograma da propagação da onda acústica para o óleo A.....	72
Figura 30: Espectrograma da propagação para a fase B do óleo Bifásico.....	73
Figura 31: Ajuste da curva de atenuação para o óleo A.....	75
Figura 32: Ajuste da curva de atenuação para o óleo B.....	76
Figura 33: (a) – (l) Reflexões de ultra-som durante o processo de separação das fases da emulsão ao longo do tempo. (e) indica o sinal espalhado na ROI durante os primeiros instantes da emulsão. (l) indica o eco produzido pela interface dos líquidos imiscíveis.	78

LISTA DE FIGURAS

- Figura 34: Espectrograma dos ecos de ultra-som refletidos do óleo bifásico. (a). 1 (reflexão de entrada para o óleo); 2 (reflexão da Interface A e B); 3(reflexão de saída do óleo); 4 (reflexão no cilindro de alumínio). (b). Modelo esquemático de coleta de reflexões no sistema bifásico.79
- Figura 35: Espectrogramas dos ecos de ultra-som registrados em diferentes instantes de tempo durante o processo de separação dos líquidos imiscíveis.....81
- Figura 36 : Evolução espectral ao longo do tempo para o eco produzido na ROI....82
- Figura 37: Evolução no tempo para os parâmetros acústicos: a) velocidade de Propagação c. b) coeficiente de atenuação β . c) parâmetro de Não linearidade B/A. d) Coeficiente Integrado de Retro-espalhamento (Backscattering) IBC.....85
- Figura 38: Velocidades de Propagação para óleos semelhantes à composição da emulsão bifásica.....86
- Figura 39: Comparação dos valores do coeficiente de atenuação acústica β entre vários tipos de óleo e o valor médio de atenuação estimado do processo de separação de fases da emulsão.....88
- Figura 40: Faixa de variações do Coeficiente de atenuação βf (dB/cm). Fonte: Adaptado de DUCK, F. A.; BAKER, A.C.; STARRITT, H C. (1998).....89
- Figura 41: Faixa de variação dos valores de Não-linearidade da emulsão em comparação com valores não-lineares de amostras biológicas. Fonte: Adaptado de DUCK, F. A.; BAKER, A.C.; STARRITT, H C. (1998).....91
- Figura 42: Faixa de variação do IBC em tecido biológico comparado com os valores obtido na emulsão. Fonte: Adaptado de DUCK, F. A.; BAKER, A.C.; STARRITT, H C. (1998).92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores dos parâmetros acústicos para os óleos A e B e para a água. ...74

Tabela 2 : Valores Médios e desvio Padrão da evolução no tempo dos parâmetros acústicos.93

LISTA DE SÍMBOLOS

B	-	Modulo de compressibilidade adiabática
c	-	Velocidade de propagação acústica
$V[n]$	-	Transformada de Fourier discreta
E	-	Esperança matemática
e	-	Função exponencial
f	-	Frequência
F_{wx}	-	Transformada de Fourier
$PER(f)$	-	Periodograma
P		Pressão
t	-	tempo
T	-	Período
$w[n]$	-	Função de janelamento
$x[n]$	-	Função discreta no domínio do tempo
$X(f)$	-	Função no domínio da frequência
$x(t)$	-	Função continua no domínio do tempo
$X(e^{jw})$	-	Função $x(t)$ vista no domínio da frequência

LISTA DE SÍMBOLOS

α	- Atenuação	[dB/cm]
β	- Coeficiente de atenuação	[dB/cm-MHz]
π	- pi	[-]
$\Re$	- Número real	[-]
$\frac{\partial}{\partial x}$	- Derivada parcial em relação à posição	[-]
$\frac{\partial P}{\partial \rho}$	- Derivada parcial da pressão em relação à densidade	[-]
∇	- Operador laplaciano	[-]
τ	- Tempo	[s]
λ	- Comprimento de onda	[mm]
ρ	- densidade	[g/cm ³]

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIMBOLOS

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1.	OBJETIVOS	20
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1.	CARACTERIZAÇÃO MEDIANTE O USO DO ULTRA-SOM	21
3.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	29
3.1	EMULSÃO	29
3.2	ANÁLISE ESPECTRAL	31
3.2.1	ESPECTROGRAMA	34
3.3	PROPAGAÇÃO ACÚSTICA	35
3.3.1	EQUAÇÃO DE CONTINUIDADE	38
3.3.3	EQUAÇÃO DE EULER	39
3.3.3	EQUAÇÃO DE ONDA	40
3.5.	ATENUAÇÃO	42
3.6.	PROPAGAÇÃO NÃO LINEAR	45
3.7.1	ESTIMATIVA PARÂMETRO DE NÃO LINEARIDADE B/A	47
3.8	RETRO-ESPALHAMENTO	49
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	53
4.1.	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	53
4.2.	EXPERIMENTO	56

SUMÁRIO

4.3.	PROCEDIMENTO DE MISTURA DO ÓLEO BIFÁSICO	58
4.3.1	ANÁLISE DE DADOS	61
4.4	ALGORITMO	70
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
5.1.	EVOLUÇÃO DOS ECOS DE ULTRA-SOM OBTIDOS DA EMULSÃO DURANTE A SEPARAÇÃO DE FASES	77
5.1.1	ESPECTROGRAMA DURANTE A SEPARAÇÃO DAS FASES DA EMULSÃO.....	78
5.1.2	PSD DE ECOS DE ULTRA-SOM COLETADOS NA ROI.....	82
5.1.3	EVOLUÇÃO NO TEMPO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS.....	83
6.	CONCLUSÕES.....	95
6.1.	SUGESTÃO	97
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A ciência e a tecnologia ampliaram a utilização do ultra-som, como ferramenta tecnologicamente potencial para a caracterização de materiais mediante análise não destrutiva com alto desempenho e baixo custo. A caracterização de materiais constitui uma área importante na manufatura e monitoramento de produtos em processos industriais (McCLEMENTS, 1995) e também na análise diagnóstica de tecidos biológicos (YOUNGCHEN *et al.*, 1986). As técnicas de inspeção ultra-sônica estudam sistematicamente a interação entre a onda ultra-sônica com o material. Estas técnicas freqüentemente medem parâmetros físicos a partir dos ecos de ultra-som provenientes da interação com o material (PAZIN *et al.*, 2003).

Desse modo, informações sobre a composição, heterogeneidade do material entre outras propriedades, podem ser avaliadas quantitativamente. Diferentes estudos têm medido parâmetros acústicos em diversos materiais (ALLER, 1977), porém poucos estudos reportaram estimativas das variações dos parâmetros acústicos em meios complexos variantes no tempo (Tal-Figiel, 2007). No entanto, outros estudos apresentaram resultados sobre variações de parâmetros acústicos em meios estáticos como pele humana (LEBERTRE *et al.*, 2000) ou meios com

variações da concentração de substâncias, (DHUKINS *et al.* 2002), (ZHANG *et al.*, 1990).

Este estudo tem por objetivo, determinar variações dos parâmetros acústicos em uma mistura de líquidos imiscíveis que se separam ao longo do tempo. A mistura dos líquidos possui um comportamento semelhante ao de uma emulsão instável e no contexto deste trabalho, a mistura foi denominada de “emulsão bifásica”.

A emulsão bifásica é vista neste estudo como um meio complexo variando dinamicamente sua estrutura. Assim, a estimativa de parâmetros acústicos, permitirá estabelecer faixas de variações associadas a mudanças de heterogeneidade da emulsão em diferentes instantes de tempo para avaliar quantitativamente a emulsão a partir da relação entre seus parâmetros.

A variação de parâmetros acústicos sempre foi associada às alterações do meio e seus valores de não linearidade (ZHENG *et al.*, 1999). Portanto, é importante definir quais são os mecanismos que afetam a variabilidade dos parâmetros envolvidos para um mesmo meio e a sua vez ampliar o entendimento no que diz respeito dos fenômenos de interação onda-emulsão. Isto contribui para o entendimento da propagação acústica não-linear envolvida e propriedades dos sinais de retro-espalhamento (*backscattering*) dados pela não-homogeneidade do meio.

Diversos estudos têm utilizado a estimativa de dois parâmetros clássicos; a velocidade de propagação acústica e o coeficiente de atenuação (DUKHIN *et al.* 2005), (DEMPESEY, 2004), para a caracterização de substâncias e materiais. Por outro lado, diferentes estudos utilizaram a estimativa do parâmetro de não linearidade B/A (DONG *et al.* 1999) e o coeficiente integrado de retro-espalhamento IBC (*integrated backscattering coefficient*), (LEBERTRE *et al.*, 2000) para a avaliar as propriedades acústicas de materiais.

Neste contexto, o estudo determinou variações ao longo do tempo para os quatro parâmetros acústicos mencionados, objetivando uma estimativa mais completa no meio de interesse e apoiando-se no fato de que a estimativa destes parâmetros é freqüentemente utilizada na caracterização de líquidos (DUKHIN *et al.* 2002), (POVEY, 1997) e portanto fornece importantes aplicações na indústria. O processamento dos sinais de ultra-som refletidos pela emulsão bifásica, e a estimativa de parâmetros como atenuação acústica foram baseados em técnicas de análise espectral (KUC e SCHWARTZ, 1979). A estimativa da velocidade de propagação foi determinada mediante a técnica do tempo de voo reportada em Povey (1997). As técnicas descritas em Zhang *et al.* (1990); Junru *et al.* (1997); Dong *et al.* (1999) e Kourtiche *et al.* (2001) apresentam o método comparativo da amplitude finita o qual foi utilizado para a medida de não linearidade B/A na emulsão. O IBC foi estimado de acordo com a técnica reportada em Lebertre *et al.* (2000).

Assim, a implementação da metodologia para a caracterização da emulsão usou uma mistura de varias técnicas que objetivaram um entendimento quantitativo da interação onda acústica com o material observado. Os resultados apresentaram curvas com variações dos valores para cada parâmetro e que correspondem a uma característica da emulsão em cada instante de tempo do processo de separação dos líquidos. A velocidade de propagação acústica não acrescentou informação relevante; isto foi visto na pequena variação do perfil de velocidade da emulsão no tempo, no entanto outros parâmetros descreveram mediante suas curvas a evolução da emulsão no tempo.

A dissertação esta dividida em seis capítulos como mostrado em baixo de forma concisa.

No Capítulo 1 é apresentada a Introdução para situar ao leitor no referente à

área de caracterização e o objetivo de estudo deste trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada uma breve revisão bibliográfica de estudos envolvidos na caracterização de alguns materiais e os parâmetros acústicos estimados mediante técnicas de análise espectral empregadas para tal fim.

No Capítulo 3 são apresentados os conceitos teóricos sobre a emulsão, teoria da análise espectral e as modelagens matemáticas utilizadas como a equação de onda e o efeito de propagação não linear. Explica-se a derivação das equações empregadas para a estimativa dos parâmetros acústicos.

No Capítulo 4 são descritos os equipamentos e a metodologia utilizada durante o procedimento experimental de emulsificação do óleo bifásico e a coleta dos ecos de ultra-som durante o processo de separação das fases. Descreve o trecho do sinal de ultra-som analisado e o método utilizado para a obtenção dos parâmetros acústicos

No Capítulo 5 são apresentados os resultados experimentais e uma breve descrição deles. Mostra-se a afinidade do perfil da velocidade de propagação c e as variações da atenuação β , B/A e IBC em relação a valores da literatura. Apresentam-se também os valores encontrados para cada fase do óleo bifásico em separado, considerados como valores de referência.

No Capítulo 6 apresenta-se uma discussão concisa dos resultados que levaram às conclusões finais.

1.1. OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo geral o estudo das variações dos parâmetros acústicos ao longo do tempo para uma mistura de líquidos imiscíveis submetidas a um feixe de ultra-som durante o processo dinâmico de separação de suas fases.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Estimar os parâmetros acústicos para cada fase do óleo bifásico A e B mediante a técnica comparativa de análise espectral, a fim de caracterizar cada fase imiscível em seu estado de repouso e estabelecer valores de referência para análise deste estudo;
2. Estimar a variação da velocidade de propagação c , o coeficiente de atenuação acústica β , o parâmetro não linear B/A e o coeficiente integrado de retro-espalhamento IBC durante o processo dinâmico de separação das fases da emulsão bifásica, objetivando a caracterização completa do óleo bifásico na região de interesse (ROI);
3. Avaliar os resultados obtidos da caracterização da ROI do óleo bifásico de acordo com os resultados descritos na literatura, para avaliar a possível aplicabilidade na caracterização de outros materiais.
4. Entender o comportamento da interação entre a onda de ultra-som e a emulsão bifásica para ampliar o entendimento sobre os tipos de informações que podem ser extraídas de materiais com comportamentos semelhantes.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A descrição física do ultra-som é feita em termos dos fenômenos ondulatórios. Suas vantagens e limitações são itens muito discutidos na atualidade. A necessidade de obter informação quantitativa do processo físico envolvido na propagação da onda mecânica para determinar propriedades do material em estudo trouxe o desenvolvimento de técnicas baseadas em modelos teóricos complexos sobre o comportamento de ondas ultra-sônicas em diversos meios de propagação. A seguir é apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre a evolução do ultra-som como ferramenta na caracterização de materiais e monitoramento de processos.

2.1. CARACTERIZAÇÃO MEDIANTE O USO DO ULTRA-SOM

A caracterização de materiais estuda sistematicamente a interação de energia mecânica com o material afim de obter informações mais detalhadas sobre o meio de interesse. O conhecimento e o desenvolvimento tecnológico têm criado ao longo do tempo um vasto campo de técnicas e equipamentos para o serviço do diagnóstico por ultra-som.

As técnicas e equipamentos têm sido baseados na teoria clássica sobre

propagação de ondas acústicas, as quais foram formuladas por Euler (1707-1783), Lagrange (1736-1813) (POVEY, 1997).

A isto, soma-se o desenvolvimento da acústica não linear que trouxe contribuições importantes para os desenvolvimentos teóricos, analíticos e experimentais dos processos ultra-sônicos complexos que foram publicados regularmente durante as quatro décadas passadas (BJORNO, 2002).

A caracterização de tecidos usando ultra-som começou com os experimentos realizados por Douglas Howry em 1947; ele detectou estruturas de tecidos suaves a partir de reflexos de ultra-sons produzidos nas interfaces. As primeiras aplicações clínicas usando ultra-som foram exibidas por Wild e Reid em 1954 descrevendo características acústicas de tumores cerebrais (DEMPSEY, 2004). Depois dos estudos iniciais favoráveis, foram realizadas melhoras em equipamentos de ultra-som e a partir da década 1960 as pesquisas foram centralizadas em países como Japão, Estados Unidos e Austrália. Assim, durante as últimas décadas na área de ultra-som, houve um desenvolvimento significativo das técnicas que pretenderam a caracterização específica de estruturas biológicas, substâncias e materiais, mediante a análise quantitativa dos seus parâmetros acústicos. Frequentemente quatro parâmetros são estimados na avaliação de materiais; entre eles dois clássicos: a velocidade de propagação acústica e a atenuação.

Wood descreveu as bases teóricas para a medição da velocidade de propagação de líquidos em 1941, usando a segunda lei de Newton¹, onde para forças atuantes sobre o material, produzia-se a aceleração deste. Os estudos reportados em Pelham e Galt (1946); Beyer e Letcher (1969); Bamber (1986),

¹ (NETA M., 2007) A segunda lei de Newton é uma das leis básicas da dinâmica. Esta lei define que a aceleração que um corpo adquire é diretamente proporcional à resultante das forças que atuam nele e tem a mesma direção e o sentido desta resultante.

apresentam alguns métodos utilizados na estimativa da velocidade de propagação acústica. As medições de velocidades ultra-sônicas apresentadas por Fry *et al.* (1972) em amostras biológicas mostraram a utilidade da estimativa de tal parâmetro, para indicar diferentes processos patológicos.

Posteriormente, a aplicabilidade de técnicas de caracterização no setor industrial medindo velocidade de propagação, pronunciaram o interesse de diversas pesquisas centradas na avaliação de produtos e alimentos. Dukhin *et al.* (2002), apresenta informações relevantes em relação a este parâmetro para fornecer conhecimento sobre propriedades e características da estrutura de produtos alimentares.

Bonnet e Tavlarides em 1987 apresentaram os efeitos da propagação de ondas de ultra-som para uma emulsão com o objetivo de encontrar uma relação entre a redução de partículas, propriedades em nível da estrutura do meio de propagação e a velocidade de propagação acústica. Assim, durante os anos de 1986 a 1996 foram realizados vários estudos sobre propagação de ondas mecânicas em emulsões e substâncias as quais permitiram o desenvolvimento da técnica do perfil de velocidade, a qual foi criada pelo *Institute Food Research*, envolvendo técnicas de medição do tempo de vôo da onda no meio de propagação (POVEY, 1997). McClements e Povey (1987), determinaram em seus estudos de velocidade de propagação ultrassônica em emulsões e suspensões, a possibilidade de determinar o tamanho de partículas, percentagem de volume disperso e viscosidade dependendo dos outros parâmetros conhecidos.

Dukhin *et al.* (2002) apresentou comparativamente o potencial da velocidade de propagação e a atenuação na caracterização de substâncias. Os estudos apresentaram que a atenuação é pouco sensível à composição molecular das

amostras ao contrário da velocidade de propagação. Desta forma a estimativa da velocidade de propagação ultra-sônica é utilizada no monitoramento do álcool na indústria.

Outro parâmetro clássico freqüentemente estimado por diversos estudos é a atenuação acústica. Sua estimativa no campo médico permite distinguir alterações em tecidos a partir de variações do coeficiente de atenuação, (GARRA *et al.* 1987). Mountford em 1972 registrou medições da atenuação que pretenderam a caracterização de tecido biológico. Estes estudos foram duplicados em 1976 para medições *in vitro* e mediante a estimativa da atenuação acústica encontraram-se diferenças em vários estados patológicos (DEMPSEY, 2004).

Existem vários métodos para a estimativa quantitativa da atenuação; entre eles um método comparativo é geralmente usado. Este método mede reflexões de um feixe de ultra-som ao atravessar uma amostra e as compara com reflexões obtidas desde um refletor padrão (KUC e SCHAWARTZ, 1979); (INSANA *et al.*, 1982). Com base no exposto anterior, a aplicação do método comparativo não é considerada para as condições *in vivo* (KIRK, 1993).

A estimativa da atenuação freqüentemente é feita a partir da divisão espectral e o cálculo do coeficiente angular da curva de atenuação (Fujii *et al.*, 2002). Uma segunda aproximação determinou o coeficiente de atenuação a partir da estimativa do coeficiente angular de diferentes curvas de atenuação determinadas a partir de espectros obtidos a várias profundidades do meio de propagação.

Aplicando um método no domínio do tempo Ophir (1982) publicou medições de atenuação acústica em músculo *in vivo*. No método foi medida a perda de amplitude da onda de ultra-som ao propagar-se a uma determinada profundidade. Os métodos comentados anteriormente foram adotados nas aplicações para a caracterização de

líquidos, substâncias, meios compostos e emulsões entre outros. Allegra e Hawley (1972), reportaram estimativas da atenuação em emulsões de óleos hexadecanos usando o método no domínio do tempo com um feixe de ultra-som a uma frequência de 9 MHz.

Por outro lado Barret *et al.* (1989) determinou a atenuação na dispersão estável de carbono em água. McClements (1990) determinou entre frequências de 1.25 a 10 MHz a atenuação de gotas de óleo em maionese. Estudos por Coupland e McClements (2000), mediram velocidade de propagação e atenuação e determinaram o tamanho de gotas em uma emulsão de óleo de milho e água. Seus resultados inferiram em informações sobre o processo de homogeneização da emulsão. De outro modo, He (1998) apresentou a estimativa da atenuação e medidas de dispersão para caracterizar o óleo castor, utilizando a informação de amplitude e fase de ecos de ultra-som mediante a técnica de transmissão.

Muitos estudos foram realizados na tentativa de obter conhecimento sobre valores de parâmetros como atenuação e velocidade de propagação em diversos materiais e misturas; Povey (1997) apresenta uma ótima descrição dos principais estudos realizados na caracterização de fluidos entre 1953 até 1996.

Por outro lado, as aplicações da acústica não linear introduziram um parâmetro importante na caracterização de materiais conhecido como B/A. O estudo desse parâmetro abrange temas relacionados à propagação não linear do meio, traduzida na distorção da onda de ultra-som e a capacidade da geração de harmônicos dada pelo meio. Aplicações da acústica não linear e a estimativa do B/A foram voltadas para áreas como: a biofísica, engenharia biomédica e processos químicos entre outros, onde as análises dos efeitos não lineares foram associadas a defeitos dos materiais e de espécimes em estudo (ZHENG, 1999).

Principalmente duas técnicas têm sido empregadas na estimativa do B/A. O método da amplitude finita, baseado na medida da amplitude do segundo harmônico e o método termodinâmico considerado só para aplicações *in vitro* e o qual baseia-se na estimativa de mudanças de velocidade com relação à pressão (DUCK *et al.*, 1998).

Neste estudo foi adotada a técnica da amplitude finita. Os estudos iniciais do parâmetro de não linearidade publicados por Beyer (1960) apresentam de forma clara o desenvolvimento das equações básicas para a estimativa do B/A a partir do termo quadrático da equação de estado¹.

Posteriormente Dun *et al.* (1981) apresentou resultados sobre a propagação acústica não linear em meios biológicos estimando B/A em amostras de sangue de suíno e concluído que os valores de não linearidade tornar-se-iam dependentes a partir de uma determinada concentração de soluto e de características da estrutura. Charles *et al.* (1985) mostrou um método ultrassônico para estimativa do parâmetro não linear em meios fluidos a partir do desvio de fase da onda de ultra-som. Dun *et al.* (1986) também apresentou a relação que existe entre a magnitude do B/A e o conteúdo macromolecular do tecido. Yongchen *et al.* (1985), determinou valores de um grupo de parâmetros acústicos entre eles o B/A em meios biológicos altamente atenuantes. Destaca que a estimativa do B/A em meios com muita atenuação, geralmente era efetuada mediante o método termodinâmico. Seus estudos projetaram ao B/A como possível ferramenta na caracterização de materiais e mostraram que o B/A era proporcional ao recíproco da velocidade de propagação na maioria de tecidos.

Estudos recentes têm apresentado a capacidade de controlar valores do B/A a

¹ (HOOD, A. 2000) Relação matemática entre a pressão o volume e temperatura.

partir de variações de concentrações do meio de propagação (DONG *et al.*, 1999). Kourtiche *et al.* (2001) apresentaram a propagação de um feixe de ultra-som e determinaram o parâmetro de não linearidade para glicerina e etanol baseado em um método comparativo. Assim, durante as ultimas décadas estudos de não linearidades causadas pelo meio, têm apresentado diversos modelos analíticos com aproximações quase-lineares, pretendendo a descrição dos fenômenos de propagação de ondas de ultra-som em meios complexos e levando em conta para isso efeitos de difração, atenuação e os efeitos não lineares envolvidos (CLEVELAND *et al.*, 1995); (LABAT *et al.*, 2000); (BARRIERE e ROYAL, 2001).

O último parâmetro avaliado neste estudo é denominado IBC e depende das propriedades de dispersão do meio avaliado. Múltiplos resultados publicados já avaliaram esse coeficiente para uma variedade de materiais e tecidos (DUCK *et al.*, 1998). Insana *et al.* (1982) apresentaram uma ótima descrição do método empregado geralmente para a estimativa do IBC de materiais e meios biológicos. McClements e Povey (1988) determinaram velocidade e atenuação em uma emulsão de óleo de girassol e água, a partir de sinais de *backscattering* dadas pela dispersão do meio. Observações do estudo indicaram que as variações da velocidade estabeleceram uma dependência em relação ao tamanho das partículas dispersas da emulsão, determinando que esse parâmetro pode ser mais sensível a determinados tamanhos das partículas.

Estudos recentes têm demonstrado a importância da estimativa do IBC em caracterização de materiais (Kruger *et al.*, 2004) e sua aplicação para medir o tamanho de partículas dispersas em produtos alimentares e emulsões (COUPLAND e McCLEMENTS, 2001). O estudo de Robertjot *et al.* (1996) avaliou o IBC em uma ampla faixa de frequências para phantoms de gelatina contendo diferentes

populações de partículas dispersas (*scatter*); seus resultados contribuíram com aplicabilidade do método para a acústica microscópica. Uma aplicação interessante foi apresentada por Wang e Shung (1997) onde eles apresentaram uma aproximação para caracterizar tecido biológico a partir do IBC e atenuação, utilizando um transdutor focalizado com feixes de ultra-som de alta frequência. Hall *et al.* (1996) apresentaram medições do IBC em líquidos e suspensões usando um método de redução da largura de banda.

Finalmente, muitos estudos têm exibido diversos métodos de caracterização medindo parâmetros acústicos na procura de conhecimento e informação da física do material analisado. Desse modo, o entendimento da interação entre ondas ultra-sônicas com meios homogêneos e heterogêneos tem permitido ao longo dos anos o desenvolvimento de técnicas versáteis que trouxeram um vasto campo de informação e benefícios do uso de ultra-som como técnica efetiva e potencial na caracterização de materiais.

Finalmente, a revolução tecnológica trouxe a era digital para o campo do ultra-som, fornecendo melhoras imediatas na resolução, formação do feixe acústico e processamento do sinal ultra-sônico de equipamentos no campo médico e áreas afins. Assim, equipamentos e transdutores de banda larga tiveram um grande impacto no desenvolvimento de tecnologias voltadas para a área de ultra-som em diversos setores que apoiaram a análise quantitativa de estruturas. (DEMPSEY, 2004).

Capítulo 3

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nesta seção são descritos conceitos e características importantes no que se refere à emulsão e às modelagens matemáticas utilizadas para o processamento de sinais de ultra-som os quais permitem a caracterização do meio de interesse neste estudo.

3.1 EMULSÃO

Uma emulsão é a mistura de dois líquidos imiscíveis, onde um dos líquidos encontra-se disperso em forma de finas bolhas dentro do outro líquido denominado fase contínua. Como as emulsões não se formam espontaneamente, o processo de emulsificar os dois líquidos imiscíveis precisa do fornecimento de energia, que pode ser oferecida através da agitação ou homogeneizadores objetivando a estabilidade cinética da emulsão. As emulsões são instáveis termodinamicamente; estas com o tempo retornam para o estado estável o qual é visto com a separação de suas fases (WALSTRA, 1992). Este processo pode durar segundos ou anos depende da formulação da emulsão, a Figura 1 apresenta as etapas da emulsão.

A estabilidade de uma emulsão depende de três fenômenos: sedimentação, floculação e quebra da emulsão. A sedimentação consiste na migração de uma das

substâncias da emulsão para cima devido à diferença de densidades das fases. As colisões entre as gotas da emulsão levam à floculação, a qual por sua vez produz a coalescência de gotículas dispersas. Esta última ocasiona a quebra da emulsão produzindo conseqüentemente a separação das fases e tornando-as duas fases contínuas (REDDY e FOGLER, 1980).

Figura 1 : Etapas de uma emulsão bifásica instável: a) Duas substâncias imiscíveis separadas em duas fases. b) Emulsão das substâncias. c) Separação das fases da emulsão instável que retorna ao seu estado natural.

3.2 ANÁLISE ESPECTRAL

A técnica matemática que permite a decomposição de um sinal no domínio do tempo em seus componentes individuais de frequência é denominada Transformada de Fourier. A análise de sinais mediante o uso dessa técnica é geralmente conhecida como análise espectral. Esta técnica permite estabelecer uma análise na dualidade tempo - frequência para facilitar o entendimento da interação da onda com o meio de propagação o qual é geralmente dependente da frequência (COHEN, 1995). A análise espectral é uma ferramenta que contribui para extrair informação a partir dos parâmetros físicos envolvidos para um meio. Assim, variações de espectros estão relacionadas com alterações do meio. Em processamento de sinais a equação da Transformada de Fourier permite representar um sinal $x(t)$ no domínio do tempo como um sinal no domínio da frequência $X(f)$, mediante a seguinte expressão:

$$TF[x(t)] \equiv X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt, \quad (1)$$

onde $TF[x(t)]$ é a Transformada de Fourier e a condição suficiente para que seja calculada, é que $x(t)$ seja um sinal estacionário e uma função integrável e finita. A $X(f)$ é uma função complexa que pode ser representada com o módulo e a fase do conteúdo espectral do sinal $x(t)$.

O espectro de potência $\phi(f)$ ou densidade espectral de potência (PSD) é determinado pela magnitude de Fourier ao quadrado, (COHEN, 1995):

$$\phi(f) = \left| \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2 = \frac{X(f)X^*(f)}{2\pi}, \quad (2)$$

onde $X^*(f)$ é o conjugado complexo de $X(f)$. A densidade espectral de potência (PSD) é uma representação de como é a distribuição de energia de um sinal em relação à frequência. A PSD pode ser estimada mediante o uso de outras técnicas, entre elas o uso do periodograma.

O periodograma é uma técnica que permite a estimativa do espectro de potência de um sinal, baseando-se na transformada de Fourier dos segmentos de um determinado sinal e realizando a média destes. Assim, para um sinal contínuo discreto $x(n)$ de N amostras a estimativa do periodograma é dada pela expressão seguinte:

$$\text{PER}(f) = \frac{1}{N} |X(f)|^2. \quad (3)$$

Para a estimativa da Transformada de Fourier é necessário multiplicar $x[n]$ por uma janela $w[n]$ com uma duração finita; deste modo, obtém-se um segmento finito do sinal $x[n]$. A janela $w[n]$ é conhecida como uma função responsável pela delimitação do trecho de sinal $x[n]$ que está sendo considerado. A aplicabilidade da função $w[n]$ a $x[n]$ define-se como janelamento e tem um efeito importante na melhora da qualidade da estimativa da Transformada para o sinal. O janelamento objetiva a obtenção de uma resposta desejada em frequência. Isto se refere à obtenção de um espectro com seus lóbulos principais mais suavizados na sua amplitude, largura de banda e com pouca deformação do seu pico. Vários tipos de janelamentos podem ser usados dependendo do tipo do sinal e da qualidade desejada. Algumas janelas comumente utilizadas são apresentadas na Figura 2.

Figura 2: Janelas freqüentemente usadas para proporcionar um melhor ajuste na dualidade tempo – freqüência. M é uma constante de tempo.

A Transformada de Fourier pode ser vista como um efeito de convolução periódica entre a função de janelamento $w[n]$ e $x[n]$, vista no domínio da freqüência e é expressa como:

$$V(e^{j\omega}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) W(e^{j(\omega-\theta)}) d\theta, \quad (4)$$

esta convolução tende a suavizar distorções de picos e descontinuidades do espectro $X(e^{j\omega})$ do sinal $x(t)$, dadas pelo efeito de janelamento.

Assim, a DFT $V[n]$ do segmento do sinal discreto $v[n] = x[n]w[n]$ é calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$V[n] = \sum_{n=0}^{N-1} v[n] e^{-j(2\pi/n)kn} \quad \text{com } k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (5)$$

3.2.1 ESPECTROGRAMA

O espectrograma é uma representação bidimensional da distribuição de energia dos componentes em frequência para um sinal ao longo do tempo. As cores na imagem representam o nível de intensidade da energia distribuída para cada ponto na dualidade tempo – frequência.

Figura 3: Espectrograma. Fonte: Adaptado de MathWorks, Inc.(2004).

O espectrograma é baseado na estimativa de Fourier para um sinal janelado no tempo (STFT). Basicamente trata-se da ruptura do sinal de interesse em pequenos segmentos temporais para aplicar análise de Fourier e determinar as frequências existentes em cada segmento. A totalidade dos espectros determinados indica a variação espectral ao longo do tempo. Desse modo, a STFT é determinada a partir de uma janela temporal de curta duração e portanto o espectrograma é expresso como o módulo STFT e calculado a partir da seguinte expressão:

$$\text{Espectrograma}(t, w) = |\text{STFT}(t, w)|^2, \quad (6)$$

$$\text{STFT}\{x(t)\} \equiv X(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-j\omega t} dt, \quad (7)$$

na Equação 7, $w(t)$ é a função de janelamento e o índice τ corresponde a um tempo de pequena duração. A função de janelamento define o nível de resolução no espectrograma. Assim, para uma janela temporal muito grande o espectrograma calculado será muito detalhado e para o caso de uma janela muito pequena o efeito é o inverso, pelo qual será muito difícil distinguir harmônicos, se estes se encontram muito próximos no espectrograma. Assim é mostrado que o espectrograma pode ser usado para estudar o comportamento de propriedades no tempo para uma frequência particular (COHEN, 1995).

3.3 PROPAGAÇÃO ACÚSTICA

Uma onda implica três notações importantes: vibrações no tempo, perturbação no espaço e movimentos devidos às perturbações no tempo-espaço. Com base na notação anterior, o ultra-som pode ser visto como uma perturbação mecânica de frequência acima da faixa audível que se propaga através de um meio elástico transferindo energia de um ponto a outro.

Estas ondas precisam de um meio ou material para sua propagação como água, tecidos ou meios contendo moléculas ou partículas. O ultra-som é produzido pela vibração de um elemento piezelétrico como resposta a um impulso elétrico.

Existem dois tipos de ondas segundo o tipo de movimento das partículas do meio de propagação. A onda longitudinal é uma onda mecânica que provoca nas partículas do meio de propagação uma vibração no mesmo sentido da propagação

dessa onda. Durante a propagação no meio estas ondas geram compressões e rarefações. A onda transversal é uma onda mecânica que se movimenta no meio de propagação de forma perpendicular à direção da sua propagação. As ondas transversais precisam de um meio sólido para sua propagação efetiva e portanto sua propagação em meio líquidos e gasosos não é efetiva, ver Figura (4).

Figura 4: Movimento das partículas de um meio para ondas longitudinais e transversais. Adaptado Nota Técnica Panametrics.

As propriedades da propagação de ondas em meios elásticos tais como: comprimento de onda (λ), frequência (f) e velocidade de propagação (c) para materiais sólidos e isotrópicos guardam a seguinte relação (ZAGZEBSKI,1996):

$$c = \lambda f. \quad (8)$$

A propagação acústica em um meio é governada por uma equação denominada equação de onda. Esta equação descreve como é a evolução da pressão em função

do espaço e o tempo. A seguir, apresenta-se a derivação da equação de onda a partir da linearização das equações unidimensionais de estado, continuidade e de Euler.

3.3.1 EQUAÇÃO DE ESTADO

A equação de estado é uma relação matemática entre a pressão P , o volume V e a temperatura T para um gás perfeito. Esta é definida como:

$$PV = nRT. \quad (9)$$

A Equação (9) pode ser linearizada durante um processo adiabático em função da densidade ρ , a expressão é como a seguir:

$$P = C\rho, \quad (10)$$

$$\text{onde } C = \frac{\partial P}{\partial \rho}.$$

Sabendo que a equação de estado pode ser escrita como uma série de Taylor, (BEVER, 1959):

$$P = P_0 + \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right) (\rho - \rho_0) + \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2} \right)_{0,s} \left(\frac{\rho - \rho_0}{2} \right)^2 + \dots, \quad (11)$$

então, é tomado o termo linear da série expresso como:

$$P - P_0 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right) (\rho - \rho_0). \quad (12)$$

A partir da equação (12) obtém-se a equação de estado linearizada, (BROWN e INSANA, 1992):

$$P - P_0 = B \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}, \quad (13)$$

onde B é o módulo de compressibilidade adiabática que mede a resistência de uma substância submetida a uma compressão uniforme. Este módulo também pode

ser definido como o incremento da pressão necessária para produzir um decrémento relativo em um volume e é expresso como :

$$B = \rho_0 \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{\text{adiabática}} \quad (14)$$

A asserção de um processo adiabático é considerada para baixas frequências, pois a pressão de longos comprimentos de onda não fornece significantes gradientes de temperatura (BROWN e INSANA, 1992).

3.3.1 EQUAÇÃO DE CONTINUIDADE

A equação de continuidade unidimensional é a equação baseada no princípio da conservação da massa. Quando uma onda atravessa um volume, podem ser provocadas alterações no volume e na sua forma, mas sua massa se conserva. Para a conservação de massa a mudança na quantidade de massa dentro do volume deve ser igual à diferença entre a massa inicial e o volume final (SHUNG e GARY, 1993). A equação é definida como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \mu) = 0, \quad (15)$$

onde μ é a velocidade local. Supondo que a densidade não muda no meio em relação ao tempo ou posição a equação pode ser reescrita assim:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \mu) = 0, \quad (16)$$

onde o termo condensação s é a mudança da densidade para um fluido. Esta é

determinada pela expressão:

$$s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} . \quad (17)$$

3.3.3 EQUAÇÃO DE EULER

A equação unidimensional de Euler descreve como são relacionadas a velocidade, densidade e pressão para um fluido em movimento. A equação da conservação do *momentum* é uma componente das equações de Euler. O *momentum* é a massa de um objeto multiplicado pela velocidade. Assim, a equação do *momentum* é apresentada a partir da segunda lei de Newton e estabelece uma relação entre as forças atuantes sobre um fluido e sua aceleração ou mudança de momentum. A expressão seguinte descreve a conservação de *momentum* (BROWN e INSANA, 1992):

$$\rho \frac{Du}{Dt} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0 , \quad (18)$$

a linearização das variáveis da equação define a seguinte expressão:

$$(\rho_0 + \rho_0 s) \left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} \right) u + \frac{\partial}{\partial x} (P_0 + p) = 0 , \quad (19)$$

assim, reescrevendo e eliminando os termos de valores pequenos na Equação 18 uma nova expressão é linearizada e definida como:

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 . \quad (20)$$

3.3.3 EQUAÇÃO DE ONDA

Uma vez definidas a equação de estado Eq.(13), continuidade Eq. (16) e Euler Eq.(20), é possível determinar a equação de onda que descreve a propagação acústica em um meio. Para isto, a derivada no tempo da equação de continuidade é tomada como a seguir:

$$\frac{\partial s^2}{\partial t^2} + \frac{\partial u}{\partial x \partial t} = 0, \quad (21)$$

depois é determinada a derivada no espaço da equação de Euler

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0, \quad (22)$$

sendo assim e substituindo as Equações 21 e 13 dentro da Equação 22 obtém-se a equação de onda:

$$-\frac{\rho_0}{B} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 p}{x^2} = 0, \quad (23)$$

esta expressão é reescrita tendo como resultado a equação de onda clássica unidimensional derivada a partir da combinação de três equações lineares fundamentais. A expressão é a seguinte, (FJELLESTAD, 2000):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (24)$$

onde c é a velocidade de propagação acústica para uma onda mecânica e é descrita como a relação entre o módulo B e a densidade ρ no material:

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}}. \quad (25)$$

A equação de onda para um modelo de N dimensões é descrita como:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0. \quad (26)$$

3.4. Velocidade de propagação

A velocidade é determinada por características do meio de propagação. Para ondas longitudinais em líquidos ou tecidos a velocidade “c” é expressa pela Equação 25 e depende da densidade do meio e da resistência a compressibilidade (ZAGSEBSKI, 1996).

A estimativa deste parâmetro freqüentemente é realizada mediante a medida do tempo de vôo de uma onda ao atravessar um material, utilizando um sistema de ultrassom em modo pulso-eco, ver técnica na Figura 5. Assim, a velocidade média c_t para um determinado meio pode ser estimada de acordo a seguinte expressão:

$$\frac{1}{c_t} = \frac{1}{c_w} - \frac{\Delta t}{2d_z} \quad (27)$$

onde c_w é a velocidade de propagação no meio de referência (usualmente é usada água ou soluções salinas) a uma temperatura conhecida e Δt é a diferença entre o tempo de vôo da onda medida no receptor com e sem a amostra (DUCK *et al.*, 1998).

Figura 5: Técnica de inserção para estimativa experimental da velocidade de propagação. Fonte adaptada de DUCK *et al.* (1998).

3.5. ATENUAÇÃO

A atenuação é um parâmetro do meio que envolve todos os fenômenos relacionados com a perda de energia em função da distância de propagação. Esta perda de energia acústica pode ser associada à reflexão, espalhamento ou absorção do meio de propagação. Para um sistema heterogêneo, a atenuação de uma onda acústica é expressa como (DUKHIN, 2005):

$$\text{Atenuação} = \text{Espalhamento} + \text{Absorção}, \quad (28)$$

onde o efeito de dispersão ou espalhamento é multidirecional e depende das flutuações em densidade e propriedades físicas a nível da estrutura que caracterizam o meio (PAZIN *et al.*, 2003).

A propagação de uma onda mecânica plana através de um meio na direção x é expressa como (KIRK *et al.*, 1993):

$$p = p_0 e^{-\alpha x}, \quad (29)$$

onde p_0 é a pressão inicial da onda mecânica na profundidade inicial do meio de propagação, isto é, a uma distância $x = 0$; α é atenuação acústica em unidades de dB/ cm.

Um modelo geralmente empregado para a estimativa da atenuação em tecidos moles é:

$$\alpha = \beta f^n, \quad (30)$$

onde β é o coeficiente de atenuação acústica e n é o valor que define a dependência da atenuação em relação à frequência f da onda de ultra-som. Para a caracterização de tecidos moles com feixes de ultra-som entre frequências de 1 a 10 MHz o valor de $n = 1$, indica a atenuação como linearmente dependente da frequência (KIRK *et al.*, 1993). Portanto, as unidades para o coeficiente β são dadas em dB/cm/MHz.

Existem duas aproximações principais para a estimativa da atenuação acústica: o método no domínio do tempo e o método de estimativa espectral. O método no domínio do tempo é um método conceitualmente simples chamado “método de transmissão”. Neste método, a informação de amplitude é usada para calcular a atenuação. Esta última é medida em relação à espessura do meio de propagação e é garantida a uma única frequência do feixe de ultra-som. Este método foi muito utilizado em aplicações clínicas (GREENLEAF, 1986). Um método interessante descrito por (OPHIR *et al.*, 1982) descreve o cálculo da atenuação para um pulso ultra-sônico de banda estreita:

$$\alpha_f = \frac{\log A_0 - \log A_x}{2x}, \quad (31)$$

onde A_x é a amplitude na profundidade x do meio de propagação, A_0 é a amplitude na profundidade inicial do meio de propagação acústica. A diferença do logaritmo da amplitude corresponde à atenuação em dB/cm à frequência f do pulso de ultra-som.

Por outro lado, o método da diferença espectral assume que a atenuação incrementa linearmente com a frequência. Este método permite a estimativa da atenuação baseada no cálculo do coeficiente de atenuação dependente da frequência (β). A estimativa deste coeficiente é determinada a partir da diferença espectral entre o meio de interesse e o de referência. A Figura 6 ilustra o método da diferença espectral. Nesta é visto que a curva resultante da diferença logarítmica espectral produz uma curva de atenuação em função da frequência. O ajuste linear da curva de atenuação permite a estimativa do coeficiente angular. Portanto, o valor do coeficiente de atenuação β pode ser determinado a partir do valor do coeficiente angular dividido por duas vezes a distância de propagação da onda no meio em estudo.

Figura 6: Método de Diferença Espectral para estimativa da atenuação. Fonte: Adaptado de SHUNG et al.(1993).

3.6. PROPAGAÇÃO NÃO LINEAR

As ondas de ultra-som podem apresentar comportamentos de propagação não lineares, os quais podem ter relação com sua alta amplitude, frequência e o meio de propagação. Para o entendimento sobre a propagação não linear de ondas acústicas é descrito um parâmetro não linear, o qual baseia-se na relação pressão - densidade para um processo adiabático. Este parâmetro deriva-se da relação entre o primeiro e o segundo termo da equação de estado descrita como uma série de Taylor vista na Equação 11. Assim, essa Equação pode ser reescrita como:

$$p = p_0 + A \left(\frac{p - p_0}{\rho_0} \right) + \frac{B}{2} \left(\frac{p - p_0}{\rho_0} \right)^2, \quad (32)$$

onde é visto que o primeiro termo da Equação 31 corresponde a uma clássica formulação da propagação linear de ondas, no entanto o segundo termo descreve o comportamento não linear da propagação.

Deste modo, o parâmetro de não linearidade B/A é descrito mediante a relação dos termos A e B da Equação 31. Como resultado obtém-se a seguinte expressão, (BEVER, 1959):

$$\frac{B}{A} = \frac{\rho}{c_0^2} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial \rho^2} \right) \equiv + \frac{\rho_0}{c_0^2} \left(\frac{\partial c^2}{\partial \rho} \right)_{0,s} - 2\rho_0 c_0 \left(\frac{\partial c}{\partial p} \right)_{0,s}, \quad (33)$$

onde é visto que o parâmetro de segunda ordem não linear B/A dependerá de mudanças da velocidade de propagação acústica em relação às mudanças na pressão durante a propagação de uma onda em um processo adiabático. Deste modo, para materiais compressíveis uma onda propaga-se mais rápido em seus picos positivos do que nos negativos (ZHENG, 1999). Isto conseqüentemente provoca efeitos não lineares os quais podem ser vistos quando a onda acústica durante sua propagação apresenta distorções na sua forma de onda gerando harmônicos. Estes últimos serão mais pronunciados com o incremento da amplitude, frequência da onda e a distância de propagação através do meio (BJORNO, 2002).

3.7.1 ESTIMATIVA PARÂMETRO DE NÃO LINEARIDADE B/A

O parâmetro B/A descreve a distorção que sofre uma onda ao propagar-se através de um meio, baseada na relação pressão-densidade. A onda acústica é afetada pela não linearidade do meio gerando uma série de novas frequências devidas às descontinuidades da onda no tempo. Como a atenuação incrementa com o incremento da frequência; no meio de propagação, os componentes de altas frequências são absorvidos mais rapidamente que as componentes de baixa frequência.

O parâmetro B/A mede o grau de não linearidade do meio e sua estimativa pode ser determinada por uma série de métodos. O método da amplitude finita é baseado na solução dada por Fubini¹ para uma equação que descreve a propagação de ondas em fluidos. A expressão é a seguinte (GREENLEAF, 1986):

$$p = p_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\sigma} j_n(n\sigma) \sin(wt - kx), \quad (34)$$

onde w é a frequência angular e $k = 2\pi/\lambda$ denota o número de onda; j_n é a função de Bessel de ordem n ; σ é um parâmetro adimensional da distância expresso como x/l ; x é a distância de propagação acústica e l é conhecida como a distância de descontinuidade (em inglês *distance shock*), esta última é descrita em função do parâmetro de não linearidade como a seguir, (BJØRNØ, 1986):

$$l = \rho_0 a_0^3 / [\pi f (2 + B/A) p_1(0)], \quad (35)$$

onde f é a frequência fundamental e $p_1(0)$ é a amplitude de pressão do primeiro harmônico da fonte de emissão sobre a profundidade inicial do meio de propagação

¹ Fubini-Ghiron (1935), Matemático Italiano que obteve a solução para propagação de ondas em fluidos não viscosos.

($x=0$).

A partir da Equação 34 é determinada uma expressão para a estimativa do segundo harmônico p_2 :

$$p_2 = p_1 \frac{j_n(2\sigma)}{\sigma}, \quad (36)$$

tomando o primeiro e o segundo termo da função de Bessel na Equação 35 é obtida uma expressão que permite a estimativa do parâmetro B/A em função do valor de amplitude do segundo harmônico $p_2(x)$ de uma onda que se propaga através de um material a uma profundidade x . A expressão é a seguinte:

$$\frac{B}{A} = \left(\frac{2\rho_0 c_0^3}{\pi f} \frac{p_2(x)}{p_1^2(0)} \frac{1}{x e^{-(\alpha_1 + \alpha_2/2)x}} \right) - 2. \quad (37)$$

A estimativa do B/A também pode ser determinada empregando um método comparativo. Esse método compara parâmetros e propriedades acústicas entre um meio de interesse e um meio de referência do qual já são conhecidas suas propriedades acústicas. Desse modo, é visto que a partir da Equação 36 obteve-se a Equação 37. Segundo Kourtiche *et al.* (2001) a expressão resultante é a seguinte:

$$\left(\frac{B}{A} \right)_x = \left(2 + \left(\frac{B}{A} \right)_{\text{ref}} \right) \frac{\rho_0 c_{0x}^3}{(\rho_0 c_0^3)_{\text{ref}}} \frac{p_{2x}}{p_{2\text{ref}}} \frac{x_{\text{ref}}}{x_x} e^{-2(\alpha_{\text{ref}} - \alpha_x)} \quad (38)$$

onde $\left(\frac{B}{A} \right)_x$ e $\left(\frac{B}{A} \right)_{\text{ref}}$ são valores de não-linearidade para o meio de interesse e o meio de referência. Os subíndices $_x$ e $_{\text{ref}}$ se referem ao meio de interesse e o meio de referência respectivamente. $p_{2\text{ref}}$ e p_{2x} são os valores de amplitude do segundo harmônico; x_x e x_{ref} são as distâncias de propagação acústica que correspondem às espessuras dos meios de propagação; $(\rho_0 c_0^3)_{\text{ref}}$ e $\rho_0 c_{0x}^3$ são os valores respectivos de

velocidade de propagação acústica e densidade .

3.8 RETRO-ESPALHAMENTO

O fenômeno de espalhamento depende das características heterogêneas e da estrutura do meio. Quando um meio é atingido por um feixe incidente, as características da estrutura são as responsáveis pela produção dos sinais de dispersão os quais dependem da heterogeneidade regional e da extensão e distribuição dessa heterogeneidade no meio (PAZIN *et al.*, 2003). Ao contrário do fenômeno de reflexão, que se dá preferencialmente em uma direção, o fenômeno de dispersão é multidirecional e apenas uma pequena parte do ultra-som espalhado pode ser captada pelo transdutor. Essa quantidade de energia é conhecida como retro-espalhamento (*backscatter*) (GIBSON, 1989), ver Figura 7.

A amplitude do sinal de retro-espalhamento permite avaliar as propriedades do material ou meio em estudo. Além disso, a forma da sua onda pode apresentar variações radicais em relação à onda incidente e portanto é vista sua importância na caracterização de processos de dispersão (SHUNG e THIEME, 1993).

Figura 7: Espalhamento do sinal de ultra-som produzido por uma partícula de dispersão de um meio não homogêneo.

A dispersão da seção transversal do meio (σ_t) é uma área que relaciona a quantidade de energia dispersa (W_s) conhecida como potência de espalhamento (*power scattering*) e a quantidade de energia incidente (I_s). A expressão é a seguinte (REID, 1993):

$$W_s = I_i \sigma_t$$

(39)

considerando que a onda espalhada por uma região de dispersão do meio é esférica, obtém-se a seguinte relação:

$$I_s = W_s / 4\pi r^2 \quad \text{ou} \quad I_s = I_i \sigma_t / 4\pi r^2 \quad (40)$$

onde W_s é a potência total espalhada. σ_t é também denominado de seção transversal de retro-espalhamento.

Especificamente a dispersão de energia é expressa em termos de um coeficiente por unidade de volume. Assim, somando as intensidades da seção transversal de retro-espalhamento é encontrado o espalhamento total contido em um volume determinado (REID, 1993).

$$\sigma = N \bar{\sigma} = \sum_{n=1}^N \sigma_n \quad (41)$$

N é o número discreto de seções transversais do meio de dispersão que são

contidas no volume. No caso contínuo é obtida a seguinte relação:

$$\sigma = \int_V \rho_s \sigma_n dv \quad (42)$$

onde dv é uma porção de volume; σ_n é o retro-espalhamento da seção transversal e ρ_s é a densidade do meio de dispersão. O espalhamento por unidade de volume (η) é determinado como:

$$\int_V \eta dv = \sigma. \quad (43)$$

η pode ser definido como o coeficiente de retro-espalhamento (em inglês *Backscattering Coefficient* -BSC) . As aproximações para a estimativa do η assumem a propagação de ondas planas a qual é aplicável somente para volumes pequenos. Segundo Shung e Thieme (1993) o BSC é definido como a quantidade de potência dispersa por unidade diferencial de volume do material. A unidade tradicional do BSC é $\text{cm}^{-1}\text{sr}^{-1}$ (LARRY *et al.*, 1993).

O coeficiente de retro-espalhamento e o coeficiente de atenuação possuem dimensões similares. Ambos descrevem a perda coerente de energia de uma onda plana ao se propagar através de um meio. A expressão seguinte exhibe o modelo unidimensional para uma onda afetada pela atenuação (REID, 1993):

$$I = I_0 e^{-(2\alpha + \eta)x} = I_0 e^{-2\alpha_t x} \quad (44)$$

α_t é a perda total de energia e inclui os efeitos dados pelo espalhamento de energia.

De outro modo, também pode ser estimado um coeficiente denominado

coeficiente Integrado de retro-espalhamento (IBC) o qual é classicamente definido como a média da energia presente para um intervalo de frequências contidas no espectro do sinal de retro-espalhamento. A estimativa deste parâmetro é um dos métodos de estudo de caracterização quantitativa tecidual. Originalmente é explorado no domínio da frequência e seu cálculo implica análise espectral de sinais de ultrassom retro-espalhados. Segundo Insana (1990), a estimativa do BSC $\eta(f, x)$ e o coeficiente integrado IBC podem ser determinadas no domínio da frequência através dos seguintes modelos matemáticos:

$$\text{BSC} = \eta(f, x) = \frac{1.45R^2}{A_0\Delta_z} w(f, x) \quad (45)$$

$$\text{IBC} = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \frac{\eta}{f_{\max} - f_{\min}} df \quad (46)$$

onde R é a distância de focalização do transdutor sobre amostra a ser atingida pelo feixe acústico. A_0 e Δ_z representam a superfície ativa do transdutor e a distância axial de propagação da onda sobre o meio (espessura da amostra) respectivamente. $w(f, x)$ corresponde à média espectral do sinal de retro-espalhamento sendo dividida por um espectro de referência o qual é estimado a partir de uma reflexão especular.

Capítulo 4

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo descrevem-se os materiais e a metodologia utilizada para a estimativa dos parâmetros acústicos da mistura dos dois líquidos imiscíveis considerada como emulsão bifásica instável neste estudo. A amostra foi submetida a um campo acústico de 5MHz em modo pulso-eco e foi monitorada durante o processo de separação de suas fases.

4.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para a caracterização da emulsão bifásica foi utilizado um sistema de ultra-som, composto pelos seguintes componentes:

- ✓ Transdutor Emissor - Receptor de ultra-som *Panametrics* de 5 MHz de 2.2 cm de diâmetro e 4 cm de comprimento; ver Figura 8 (a) e (b).
- ✓ Equipamento de ultra-som *Panametrics Model 5800*; ver Figura 9.

Para aquisição de dados desde o sistema de ultra-som foi utilizado o:

- ✓ Osciloscópio Tektronik TDS 3034B - 300 MHz.

Figura 8: Transdutor Emissor - Receptor de Ultra-som. a) Vista frontal. B) vista lateral.

Figura 9: Equipamento de Ultra-som

A partir do feixe de ultra-som focalizado foi obtida uma reflexão especular desde um refletor cilíndrico de alumínio com as seguintes dimensões: 5 cm de espessura e 5.1 cm de raio, ver Figura 10. Esse sinal foi obtido durante a propagação da onda no meio de referência (água).

Figura 10: Refletor cilíndrico de alumínio.

Os experimentos foram conduzidos em um tanque acústico com 18 cm de altura;

ver Figura 11. A altura selecionada foi devido a que o transdutor de ultra-som teve de ser posicionado a sua distância focal, onde efeitos de difração são minimizados e as amplitudes das ondas são mais uniformes.

Figura 11: Tanque acústico.

A amostra a ser caracterizada neste estudo foi uma mistura de dois líquidos imiscíveis (ver Figura 12) a qual pode ser considerada sobre agitação como uma emulsão bifásica instável. A amostra é composta por:

- ✓ Óleo mineral de cor azul com densidade de 0.8455 g/cm^3
- ✓ Mistura de Óleo vegetal com água deionizada. Óleo transparente com densidade de 1.0199 g/cm^3

Figura 12: Óleo bifásico.

A Figura 13 apresenta o sistema integral utilizado para a caracterização paramétrica dos líquidos imiscíveis durante o processo de separação de suas fases. As estimativas dos parâmetros acústicos foram feitas experimentalmente mediante o método comparativo, com e sem a amostra no caminho de incidência da onda de ultra-som.

Figura 13: Sistema utilizado para a captura do sinal de ultra-som ao interagir com a emulsão.

4.2. EXPERIMENTO

O transdutor de ultra-som foi posicionado a uma distância de focalização de 18 cm acima de um tanque acústico cheio de água. A água serviu como meio de acoplamento para transferir energia desde a fonte de emissão até a amostra. Os sinais de ultra-som foram coletados com uma taxa de amostragem de 100 M/S.

Inicialmente uma reflexão especular foi coletada para servir de sinal de referência. O sinal é visto na Figura 15.

Posteriormente os ecos procedentes da emulsão bifásica foram coletados como visto na Figura 14, durante o processo de separação das fases dos líquidos imiscíveis.

Figura 14: a) Captura do sinal de ultra-som na água (meio Referência). b) Captura do Sinal de ultra-som na amostra de óleo Bifásico.

Figura 15: Sinal de ultra-som de referência obtida durante a propagação na água.

4.3. PROCEDIMENTO DE MISTURA DO ÓLEO BIFÁSICO

Antes de estimar as variações dos parâmetros acústicos no tempo, inicialmente o óleo bifásico foi emulsificado durante 10 segundos mediante um procedimento de agitação manual. A Figura 16 apresenta em exemplo as etapas da emulsão bifásica instável durante o processo de separação das fases líquidas ao longo do tempo.

Figura 16: Estabilização das fases da emulsão ao longo do tempo.

Nas Figuras 17 (a)-(g) são apresentados em média os diferentes tamanhos das gotículas de óleo emulsionadas. Inicialmente na Figura 17.(a) são percebidos na emulsão, gotículas de óleo com tamanhos menores do que o comprimento de onda do feixe de ultra-som de 0.27 mm. A evolução da emulsão no tempo produz a coalescência dos glóbulos de óleo emulsificados na fase mais densa, induzindo o aumento do tamanho das gotículas de óleo em valores de 1 a 3 mm aproximadamente como visto na seqüência das Figuras 17. (c) – 17. (f). Finalmente a separação dos líquidos e a diminuição das bolhas de óleo dada pela coalescência é vista na Figura 17.(g).

Figura 17: (a)-(g): Tamanhos das gotículas de óleo vistas na região de interesse (ROI) durante o processo de separação das fases da emulsão.

O processo de estabilização das fases foi submetido a um feixe de ultra-som de 5 MHz em modo pulsado com uma taxa de repetição de pulso (FRP) de 200 kHz. O processo foi monitorado durante 300 segundos aproximadamente, tempo no qual as fases separam-se e desse modo foram coletadas sequencialmente doze reflexões de ultra-som que registraram o comportamento da interação onda-emulsão em cada instante do processo de separação.

4.3.1 ANÁLISE DE DADOS

As reflexões de ultra-som analisadas correspondem à região onde é formada a interface dos líquidos imiscíveis. Neste estudo essa zona foi considerada como região de interesse ROI, pois nessa região ocorrem mudanças importantes em relação à estabilidade da mistura nos dois líquidos.

Inicialmente foram analisadas reflexões de ultra-som coletadas nos primeiros instantes da emulsão bifásica. Os sinais refletidos pela amostra correspondem a sinais de retro-espalhamento produzidos pela não homogeneidade do meio emulsificado. A Figura 18 exibe esta situação.

A instabilidade da emulsão levou rapidamente ao longo do tempo à separação dos líquidos imiscíveis. A interação entre a onda acústica e a mistura líquida durante esse processo permitiram observar progressivamente a formação de um eco de ultra-som na ROI, o qual foi analisado mediante análise espectral a fim de determinar os parâmetros acústicos. A Figura 19 exibe o eco de ultra-som formado na interface depois da separação dos líquidos imiscíveis.

Figura 18: Trecho do sinal de ultra-som na ROI visto durante os primeiros instantes do meio emulsificado.

Figura 19: Ecos de ultra-som refletidos desde o óleo bifásico com suas fases estáveis.

A velocidade de propagação acústica foi avaliada baseada na medida do tempo de voo para uma onda que atravessa o óleo bifásico. Foi utilizado um só transdutor para transmitir e receber as ondas de ultra-som. Portanto a distância percorrida pela onda foi duas vezes o caminho de propagação da onda incidente. A Figura 20 ilustra a identificação dos ecos no tempo, necessários para determinar o tempo de voo da onda e por tanto estimar a velocidade de propagação na amostra líquida. Desse modo, foi determinado um perfil de velocidades para cada um dos ecos de ultra-som coletados na ROI durante os instantes finais do processo de separação dos líquidos imiscíveis, onde são perceptíveis as reflexões ao contrário dos instantes iniciais da emulsificação.

Figura 20: Reflexões de ultra-som no óleo bifásico.

Posteriormente procedeu-se a realização da análise espectral para os ecos obtidos da amostra e para o sinal de referência.

A densidade espectral de potência foi determinada mediante a estimativa do

periodograma, ver Equação 5. Esta estimativa foi realizada usando uma janela Blackmanharris (Mathworks, Inc, 2004). O tamanho da janela teve a mesma largura do pulso do ultra-som no domínio do tempo dado pelo equipamento. A Figura 21 apresenta o eco de ultra-som coletado no meio de referência e no óleo bifásico com seus respectivos espectros de potência:

Figura 21: a) Sinal de Referência; b) Espectro de Potência de Referência $S_{ref}(x, f)$; c) Eco da interface do óleo bifásico; d) Espectro de Potência do Eco na Interface $S(x, f)$.

Um método alternativo para a estimativa da atenuação e para o qual não é necessário considerar que o pulso de ultra-som gerado pelo transdutor é gaussiano é

a estimativa mediante divisão espectral. A estimativa consiste na divisão entre o espectro $S(x,f)$ (Fig. 21.d) e o espectro $S_{ref}(x,f)$ (Fig. 21.b) obtido do sinal de referência. A expressão é a seguinte Treece *et al.* (2005):

$$A(x,f) = \frac{S(x,f)}{S_{ref}(x,f)}. \quad (47)$$

A atenuação $A(x,f)$ produz um efeito passa baixas sobre o espectro de potência $S(x,f)$ que é visto quando este último é comparado com o espectro de potência $S_{ref}(x,f)$ do meio de referência, ver Figura 22.

Figura 22: Redução da frequência central produzido pela atenuação

A partir da diferença logarítmica espectral entre os espectros $S_{ref}(x,f)$ e $S(x,f)$ expressos em dB é estimada uma curva de atenuação. Sobre a curva resultante é aplicada uma regressão linear objetivando a estimativa do coeficiente de atenuação. A Equação 48 descreve a obtenção da curva de atenuação como um modelo linear:

$$\ln\left(\frac{S(x,f)}{S_{ref}(x,f)}\right) = -\beta f + b, \quad (48)$$

onde β é conhecido como coeficiente de atenuação. O valor desse coeficiente corresponde à divisão do coeficiente angular da reta por duas vezes a distância de propagação acústica dentro da emulsão. As unidades desse coeficiente são dadas em dB/cm-MHz. O conhecimento do coeficiente de atenuação β permitiu estimar o valor da atenuação α mediante o uso da Equação 30 vista no Capítulo 2. A Figura 23 apresenta a curva de atenuação com seu ajuste dado para um eco de ultra-som na interface do óleo bifásico.

Figura 23: Ajuste linear para a atenuação

Os valores da velocidade de propagação acústica, β e a densidade permitiram a estimativa do parâmetro não linear de segunda ordem B/A. Este parâmetro foi estimado mediante a análise da amplitude do segundo harmônico (ver Figura 24)

determinada a partir dos espectros de potência para o sinal de referência e os ecos da mistura de líquidos imiscíveis obtidos durante o processo de separação. O modelo matemático aplicado é visto na Eq.(38) no capítulo 2.

Uma curva de diferentes valores do B/A ao longo do tempo foi obtida. Essa curva representa a evolução temporal do comportamento acústico não linear dentro da emulsão instável.

Figura 24: Identificação do segundo harmônico $P2x_{ref}$ e $P2x$ para o espectro de Referência $S_{ref}(x, f)$ e o espectro atenuado $S(x, f)$ na ROI do óleo bifásico respectivamente.

A estimativa do B/A requer muita prudência, especialmente quando o meio em estudo é não homogêneo. Isto é porque a não homogeneidade do meio que leva a uma distorção de fase da onda transmitida conhecida como cancelamento de fase e portanto causa uma medição aparente do valor de atenuação e da velocidade de propagação, que conseqüentemente implicam em uma medida errônea do parâmetro

B/A.

Neste estudo os efeitos de difração foram desconsiderados com base no estudo reportado por Dunn *et al.* (1981) onde relata que o erro na estimativa do parâmetro de não linearidade sem considerar a difração no campo próximo é muito pequeno (2%). Além disso, segundo wang e Shung (1997), o método comparativo que é utilizado neste estudo para medir cada parâmetro acústico minimiza efeitos dados pelas características do transdutor entre eles a difração.

Por outro lado, a estimativa dos parâmetros acústicos velocidade, β e B/A também foram realizadas para cada fase do óleo bifásico, com o objetivo de obter valores de referência dos parâmetros acústicos referentes a cada líquido imiscível.

O óleo bifásico foi separado em duas fases diferentes: A e B. Cada um deles foi colocado dentro de um recipiente de alumínio de 7mm de profundidade. Desse modo, para cada amostra foram estimados os parâmetros acústicos utilizando as mesmas técnicas de processamento de dados descritas acima para a caracterização dos líquidos imiscíveis emulsificados. A Figura 25 exibe as fases separadas que compõem o óleo bifásico.

Figura 25: Recipientes de alumínio contendo cada fase de óleo bifásico. a) óleo A. b) Óleo B

A Figura 26 apresenta em exemplo como é a onda de ultra-som refletida desde a amostra de óleo A contida no recipiente de alumínio.

Figura 26: Sinal de ultra-som refletido pelo óleo A.

A reflexão 1 é dada por uma camada fina de acetato. O sinal entre as reflexões 1 e 2 representa a propagação da onda de ultra-som através da espessura do óleo contido no recipiente de alumínio. A reflexão 2 é dada pela base do recipiente de alumínio.

Finalmente para determinar o parâmetro BSC primeiramente o sinal de retro-espalhamento (*backscattering*) foi dividido em vários segmentos temporais de largura semelhante à do pulso do ultra-som emitido pelo equipamento, ver Figura 27.

Para cada segmento de *backscattering* foi determinada sua PSD e posteriormente a média espectral de todas as PSD calculadas. Depois utilizando a PSD do sinal de referência usado neste estudo e a média espectral do sinal de *backscattering* foi calculado o BSC e o IBC aplicando o modelo matemático visto na

Equação 45 e Equação 46 do Capítulo 2.

Figura 27 : Segmentação do sinal de *backscattering* para a estimativa da média espectral usada no cálculo do BSC e IBC.

4.4 ALGORITMO

Uma sub-rotina realizada em Matlab, Inc.(2004) permitiu a estimativa dos parâmetros acústicos a partir do processamento de arquivos correspondentes às reflexões de ultra-som desde a amostra. O algoritmo utilizado para avaliar as variações dos parâmetros acústicos durante o processo de separação de suas fases é descrito na Figura 27.

Figura 28: Estrutura básica da sub-rotina para a estimativa dos parâmetros acústicos.

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados que se obtiveram da avaliação dos parâmetros acústicos para a emulsão bifásica durante o processo dinâmico de separação de suas fases. Também são apresentados os resultados dos parâmetros acústicos para cada fase separada do óleo bifásico.

A seguir são exibidas as representações tempo – frequência para cada fase de óleo bifásico considerado em este estudo.

Figura 29: Espectrograma da propagação da onda acústica para o óleo A.

A Figura 29 mostra o diagrama tempo – frequência da propagação acústica para o óleo de menor densidade. São observadas duas reflexões dadas pelas paredes do recipiente que contém o óleo. A primeira reflexão produzida na superfície do óleo é identificada no eixo do tempo do espectrograma aos 2.98 μs . A segunda reflexão provocada pela base do recipiente de alumínio ocorre aos 12.21 μs . O intervalo entre 2.98 μs a 12.21 μs representa aproximadamente a distância que a onda de ultra-som teve que percorrer durante sua propagação; esta distância corresponde a 14 mm; duas vezes a espessura do recipiente de alumínio que contém a amostra de óleo. O tempo de propagação da onda de ultra-som para este óleo A foi de 9.23 μs .

Figura 30: Espectrograma da propagação para a fase B do óleo Bifásico.

A Figura 30 mostra o diagrama tempo – frequência da propagação para o óleo de maior densidade. As duas reflexões provocadas pelas paredes de entrada e saída do recipiente são identificadas respectivamente nos tempos de 2.95 μs e 11.79 μs . O

tempo de propagação da onda de ultra-som para este óleo “B” foi de 8.84 us. A Tabela 1 apresenta a velocidade de propagação acústica média para os óleos A e B. As velocidades estimadas apresentaram incrementos de 0.26% e 4.49% com relação ao valor da velocidade de propagação acústica estimada para a água em 1512 m/s.

Tabela 1. Valores dos parâmetros acústicos para os óleos A e B e para a água.

Amostra	Velocidade Propagação (m/s)	Coeficiente Atenuação β (dB/cm-MHz)	Parâmetro Não linear B/A
Óleo A	1516	0.82	8.43
Óleo B	1583	0.59	10.74
Valor médio Entre A e B	1549	0.70	9.58
Água	1512	0.0048	5.49
Água Literatura (POVEY)	1482	0.0042	5.20

A velocidade de propagação acústica medida para o óleo B foi maior que para o óleo A, porém a diferença foi mínima, 4.24%. A estimativa da velocidade de propagação pode apresentar imprecisões devido à seleção manual do intervalo que corresponde ao tempo de voo da onda. O valor padrão da velocidade de propagação longitudinal encontrado no banco de dados do *software wave 2000 pro* (cyberlogic, Inc.) para óleos minerais e vegetais com densidades entre 0.840 g/cm³ e 0.921

g/cm³, oscilaram entre valores de 1460 m/s – 1540 m/s e seu valor médio foi considerado como referência. Desse modo, a variação da velocidade estimada para o óleo A e B tiveram um respectivo incremento de 1.05% e 5.24% em relação ao valor médio de referência. É importante ressaltar que os óleos estudados não são completamente puros e possuem outras substâncias misturadas tais como: extrato de algas, cloreto de sódio entre outras. Portanto para avaliar os resultados dados pela sub-rotina desenvolvida, foram usados valores de referência de óleos minerais e vegetais parecidos aos deste estudo. A seguir são exibidas nas Figuras 31 e 32 as curvas obtidas como resultado da diferença espectral entre os óleos e o meio de referência (água) a fim de determinar o coeficiente de atenuação. Nas Figuras 31 e 32 também são apresentados os ajustes lineares a partir dos quais foram estimados os respectivos coeficientes de atenuação acústica para cada óleo separado do sistema bifásico. O óleo A apresentou uma atenuação de 28.04% maior que a atenuação estimada para o óleo B.

Figura 31: Ajuste da curva de atenuação para o óleo A.

Figura 32: Ajuste da curva de atenuação para o óleo B.

Os resultados da atenuação acústica que foram determinados para os óleos A e B deste experimento foram comparados com o valor da atenuação de um material que representasse de forma razoável uma referência média entre os dois óleos. Procurou-se um material com uma composição semelhante à amostra bifásica e que tivesse valores médios da densidade e velocidade ultrassônica. Desse modo, foi selecionado da literatura (DONG *et al.*, 1999) o óleo de milho, o qual apresenta valores de densidade e velocidade de propagação acústica de 0.920 g/cm³ e 1466 m/s respectivamente. O coeficiente de atenuação acústica encontrado para esse óleo é 0.24 dB/cm-MHz. Desse modo, foi visto que a variação do coeficiente de atenuação do óleo A e B com relação a esse valor marcado como referência foi de 70.74% e 59.32% respectivamente.

Por outro lado, o valor do parâmetro não linear de segunda ordem B/A foi

estimado em 8.43 e 10.74 para as fases A e B do óleo bifásico respectivamente. Estes valores são próximos dos valores encontrados na literatura para diferentes tipos de óleo, entre eles: o óleo de milho com um valor do B/A de 10.7 (BJØRNØ, 2002) e o óleo de soja com valores não-lineares determinados entre: 10.2 - 9.3 e para a gordura 11.0 (JUNG *et al.* 2002).

Existe uma diferença de 21.50% entre os valores de não linearidade dos óleos A e B mencionados. Percebeu-se que o óleo de menor atenuação apresenta um valor maior do parâmetro B/A.

5.1. EVOLUÇÃO DOS ECOS DE ULTRA-SOM OBTIDOS DA EMULSÃO DURANTE A SEPARAÇÃO DE FASES

A seguir é apresentada a evolução no tempo para os ecos de ultra-som coletados desde a emulsão bifásica durante o processo de estabilização das fases A e B. Nas Figuras seguintes os índices (a) - (l) representam diferentes instantes de tempo de aproximadamente 25 s.

A Figura 33 apresenta doze ecos de ultra-som coletados em um tempo de 300 segundos. Na Figura 33 (e) o eco próximo a 40 μ s corresponde à reflexão dada pela interface do sistema bifásico é visto que esse eco não é percebido nas Figuras 33. (a) até 33. (d) devido a mínima diferença de impedancia e o processo de espalhamento dado pelas gotículas na emulsão. A partir da Figura 33.(f) até a Figura 33.(l) percebe-se a formação de um eco na ROI o qual incrementa sua amplitude e define uma melhor forma de onda em relação ao tempo da estabilização das fases da emulsão.

Figura 33: (a) – (l) Reflexões de ultra-som durante o processo de separação das fases da emulsão ao longo do tempo. (e) indica o sinal espalhado na ROI durante os primeiros instantes da emulsão. (l) indica o eco produzido pela interface dos líquidos imiscíveis.

5.1.1 ESPECTROGRAMA DURANTE A SEPARAÇÃO DAS FASES DA EMULSÃO

As análises dos espectrogramas forneceram informações preliminares que permitiram prever a resposta da emulsão à excitação acústica. A Figura 34 exibe a

representação tempo – frequência da propagação de um pulso de ultra-som através do óleo bifásico com suas fases estáveis. No espectrograma, quatro reflexões podem ser distinguidas; estas são identificadas da seguinte forma.

Figura 34: Espectrograma dos ecos de ultra-som refletidos do óleo bifásico. (a). 1 (reflexão de entrada para o óleo); 2 (reflexão da Interface A e B); 3(reflexão de saída do óleo); 4 (reflexão no cilindro de alumínio). (b). Modelo esquemático de coleta de reflexões no sistema bifásico.

A reflexão 1 é dada pela parede de plástico do recipiente que contem o óleo bifásico. Essa reflexão é o sinal que permite referenciar a entrada ao sistema bifásico. A reflexão 2 é produzida na região ROI onde se consolida a interface do óleo de menor densidade A e o óleo de maior densidade B. Esse eco de ultra-som é o sinal analisado neste estudo para monitorar progressivamente a estabilidade da

emulsão e as características acústicas na ROI. A Reflexão 3 produzida pela parede final do recipiente de plástico permite identificar a saída do sistema bifásico. A reflexão 4 é dada pelo cilindro de alumínio.

A Figura 35 apresenta os espectrogramas de cada eco de ultra-som coletado desde a emulsão durante o processo de separação das fases. Observou-se que para o início desse processo, existe um amplo espalhamento de energia devido às inúmeras gotículas de óleo “A” emulsionadas no óleo mais denso. Essas gotículas espalharam uma quantidade considerável de energia entre os tempos de propagação de 20 a 40 μ s vistos principalmente nos primeiros quatro espectrogramas da Figura 35.(a)-(d). Nesses instantes de tempo existe um incremento de atenuação por espalhamento, produto da interação entre o maior comprimento da onda e o menor tamanho das gotículas da emulsão. Esse processo de interação produz um espalhamento multidirecional de energia.

Nos espectrogramas também é vista uma diminuição rápida da energia dispersa na ROI ao longo do tempo, indicando assim a diminuição das gotículas de óleo da emulsão e mostrando progressivamente a separação dos líquidos mediante a formação do eco bem definido na interface, ver Figura 35.(l). O processo de separação dos líquidos imiscíveis em relação ao tempo tem uma duração de aproximadamente 5 minutos. Esse tempo em termos de estabilidade de emulsão é bastante rápido, o qual determina que a mistura dos líquidos deste estudo seja considerada como uma emulsão bastante instável. Observa-se que as Figuras 35.(a), 35.(b), 35.(c) e 35.(d) apresentam o maior estado de emulsificação ocorrido durante um intervalo de tempo curto (1:40 min. aproximadamente).

Figura 35: Espectrogramas dos ecos de ultra-som registrados em diferentes instantes de tempo durante o processo de separação dos líquidos imiscíveis.

5.1.2 PSD DE ECOS DE ULTRA-SOM COLETADOS NA ROI

Para avaliar a evolução no tempo dos parâmetros acústicos foram estimados os espectros de potência respectivos ao eco de ultra-som dado na ROI da emulsão bifásica os quais foram vistos na Figura 33.

Figura 36 : Evolução espectral ao longo do tempo para o eco produzido na ROI.

Os espectros estimados nas Figuras 36.(a) - 36.(e) apresentaram uma maior

deformação do pico da frequência fundamental e valores de amplitude altos para os harmônicos gerados. Observou-se que algumas componentes de alta frequência são mais atenuadas para as PSD determinadas nos instantes finais do processo de separação das fases ao contrário das PSD estimadas durante os instantes iniciais do processo de separação. O anteriormente exposto é melhor visto comparando os espectros das Figuras 36.(c) e 36.(f) ou comparando as Figuras 36.(h) e 36.(k); observando que a atenuação é vista como um efeito passa baixo mediante a atenuação das componentes de alta frequência. Posteriormente nas Figuras 36.(e) até 36.(l), observou-se uma melhor definição na formação do pico da fundamental e os lóbulos dos espectros. A consolidação da interface dos líquidos imiscíveis produz um eco na ROI com menos descontinuidades pelo qual também é visto uma diminuição progressiva da amplitude dos harmônicos durante a evolução dos espectros.

5.1.3 EVOLUÇÃO NO TEMPO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS

A seguir são apresentadas as curvas que representam o comportamento e a variação de cada parâmetro acústico ao longo do processo de estabilização das fases da emulsão.

Em primeira instância a velocidade de propagação c média foi considerada para ser um valor constante na estimativa do B/A , devido ao fato de que as medições realizadas de c mostraram variações mínimas oscilando próximo do valor de 1350 m/s (ver Figura 37.(a)). A velocidade constante objetivou minimizar o erro na estimativa do B/A o qual depende da medida de c . A seguir, a Figura 37 apresenta a estimativa das variações dos parâmetros acústicos na interface da

emulsão em relação ao tempo.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 37: Evolução no tempo para os parâmetros acústicos: a) velocidade de Propagação c. b) coeficiente de atenuação β . c) parâmetro de Não linearidade B/A . d) Coeficiente Integrado de Retro-espalhamento (Backscattering) IBC.

O perfil da velocidade c na Figura 37.(a) apresentou uma variação máxima de 0.58% e uma variação mínima de 0.81% em relação ao valor de 1354 m/s estimado da média das velocidades durante o processo de separação das fases. A faixa de variação entre a mínima e máxima velocidade de propagação registrada durante a separação dos líquidos foi de 1.39%.

Na Figura 38 são observados diferentes valores da velocidade de propagação acústica em óleos minerais e vegetais. Observa-se a diferença em relação ao valor médio da emulsão de óleo bifásico.

Figura 38: Velocidades de Propagação para óleos semelhantes à composição da emulsão bifásica.

A velocidade c não forneceu informações relevantes em relação ao comportamento da mistura dos líquidos no tempo, devido a sua tendência a permanecer em um valor quase constante como visto na Figura 37.(a). A velocidade de propagação média na emulsão foi 12.58% menor que a velocidade média entre os óleos A e B descrita na Tabela 1.

O parâmetro β descrito mediante a curva de atenuação acústica vista na

Figura 37.(b) mostra que na ROI da emulsão, existe uma tendência do sistema bifásico de incrementar o valor de atenuação em relação ao tempo de estabilização da emulsão. Essa curva de atenuação descreve o processo de separação dos líquidos emulsionados e pode ser interpretada observando-se que; durante os primeiros instantes (primeiros 100 segundos), a atenuação causada pelas gotículas de óleo não é maior que a atenuação causada pela formação da Interface na ROI durante os instantes finais. Desse modo, a diferença de impedâncias entre os líquidos em separação produz um eco que implica uma perda de energia ao ser refletida e por tanto essa quantidade de energia que não foi transmitida para o restante da emulsão bifásica (a partir dos 150 segundos) insinua um fator atenuante na ROI, visto nos valores mais altos da curva de atenuação da Figura 37. (b) onde começa a quebra da emulsão.

Observou-se uma tendência da média dos valores da curva de atenuação β de permanecer próximo ao valor médio de atenuação entre o óleo A e B determinado em 0.70 dB/cm-MHz (ver Tabela 1). Este último valor foi considerado como referência para avaliar a variação do parâmetro β da mistura dos líquidos em estudo, pois esse valor representa uma aproximação da atenuação entre os dois líquidos. A variação máxima e mínima de atenuação determinou, em relação ao valor médio de referência da Tabela 1, percentagens de variação de 61.53% e 14.63% respectivamente. O parâmetro β teve uma variação máxima de 46.9% ao ser comparado com o valor mínimo de atenuação registrado durante o processo de separação das fases.

Por outro lado, os valores de atenuação obtidos desde a emulsão também foram comparados com valores de óleos vegetais (ver Figura 39), minerais extraídos da base de dados de *Laust Pedersen* (ONDA CORPORATION, 2006), pois estes líquidos guardam uma similitude em relação a composição dos líquidos

analisados neste experimento.

Figura 39: Comparação dos valores do coeficiente de atenuação acústica β entre vários tipos de óleo e o valor médio de atenuação estimado do processo de separação de fases da emulsão.

O valor médio dos diferentes tipos de óleo foi estimado em 1.13 dB/cm-MHz e apresenta uma diferença de 13.74% em relação ao valor médio dos valores da curva de atenuação β da Figura 37.(b), estimado em 1.31 dB/cm-MHz (valor da emulsão bifásica visto na Figura 39).

A Figura 40 apresenta as variações do coeficiente de atenuação α conhecido como βf , para diversos tecidos biológicos. Nessa figura também é mostrado o intervalo onde se situam os resultados obtidos da emulsão bifásica. Esta comparação mostra que a emulsão bifásica poderia ser um bom material para modelar *phantom* que permitam simular tecido estratificado devido a que se observaram valores do coeficiente de atenuação entre a faixa de valores para pele e sistema músculo-esquelético.

Figura 40: Faixa de variações do Coeficiente de atenuação $\alpha = \beta f$ (dB/cm).

Fonte: Adaptado de DUCK, F. A.; BAKER, A.C.; STARRITT, H C. (1998).

Por outro lado, o resultado da evolução do parâmetro B/A visto na Figura 37.(c) apresentou inicialmente valores baixos de não linearidade devido à menor amplitude do sinal retro-espalhado pela dispersão de glóbulos de óleo A. Durante os primeiros instantes da emulsão, a não-homogeneidade do meio induz o efeito de *shock* o qual conseqüentemente produz uma descontinuidade na onda; essa deformação manifesta-se com a propagação harmônica dentro do meio. Dessa forma, observou-

se que conforme ocorre a evolução da emulsão no tempo a coalescência entre as gotículas tende a diminuir a não homogeneidade do meio dada pela fase dispersa, assim os valores não lineares de segunda ordem da Figura 37. (c) obtidos durante os primeiros 125 segundos mostraram uma tendência de diminuir o valor do B/A. Desse modo, nos primeiros instantes do processo de separação das fases onde ainda não acontece a quebra da emulsão, os resultados determinaram que a atenuação possui uma tendência de reduzir a formação do *shock* e por tanto fornece um menor valor de não linearidade, que está de acordo ao estudo de Cartense *et.al* (1986).

O valor B/A apresentou uma variação de 51% entre o seu valor mínimo e máximo. As curvas de atenuação acústica e o B/A vistas nas Figura 37.(b) e 37.(c) podem ser utilizadas para monitorar o processo de separação e estabilização das fases da emulsão, pois o incremento e decremento desses parâmetros acústicos no tempo permitem interpretar e descrever a evolução da emulsão. A Figura 41 apresenta um esquema comparativo do valor de não-linearidade freqüentemente estimado em caracterização de tecido biológico. Também na figura é apresentado onde se situa a faixa de variação dos valores medidos neste estudo para a emulsão bifásica em comparação com medições em meios biológicos.

Figura 41: Faixa de variação dos valores de não-linearidade da emulsão em comparação com valores não-lineares de amostras biológicas. Fonte: Adaptado de DUCK, F. A.; BAKER, A.C.; STARRITT, H C. (1998).

O parâmetro de retro-espalhamento visto na Figura 37.(d) apresenta a curva que descreve o comportamento do IBC durante a evolução da emulsão no tempo. A diminuição dos valores do IBC apresentaram o resultado especulado ao notar que a quantidade de energia dispersa pelo meio tende a diminuir em relação à quebra da emulsão dada pela coalescência das gotículas de óleo A dispersas no B. Este processo conduz à separação dos líquidos em duas fases homogêneas com uma diminuição significativa dos sinais retro-espalhados os quais dependem da

heterogeneidade do meio. Devido à ausência de valores de referência do IBC para os óleos analisados neste estudo, os resultados foram avaliados em relação a uma substância da qual fosse conhecido o IBC e que por tanto tivesse semelhantes valores de densidade e velocidade de propagação. Sendo assim, foi escolhida o sangue, que possui uma densidade de 1.06 g/cm³, uma velocidade de 1555 m/s (valores extraídos de Shung (1993)) e um valor do IBC na faixa de 10e-4 a 10e-5 (cm⁻¹ sr⁻¹) (DUCK et al.,1998).

Figura 42: Faixa de variação do IBC em tecido biológico comparado com os valores obtido na emulsão. Fonte: Adaptado de DUCK, F. A.; BAKER, A.C.; STARRITT, H C. (1998).

A maior parte dos estudos preditivos sobre espalhamento (*scattering*) são baseados em modelos simulando sangue mediante a mistura de fluidos aquosos e esferas para simular os glóbulos (BAMBER, 1998). Desse modo, percebeu-se que os resultados do IBC na emulsão estiveram entre uma faixa razoável apresentando um valor máximo e mínimo do IBC de 4.83×10^{-4} e 5.64×10^{-5} respectivamente. Os resultados obtidos da avaliação do IBC na emulsão se apresentam de forma comparativa na Figura 42 em relação a valores estimados em tecido biológico.

A Tabela 2 apresenta o valor médio e o desvio padrão para cada parâmetro acústico visto nas Figura 37 (a)-(d). A média do valor de β e o B/A apresentaram respectivamente uma variação de 46.56% e 18.47% com respeito aos valores médios de β e B/A determinados entre as fases A e B e que foram registrados na Tabela 1.

Tabela 2 : Valores Médios e desvio Padrão da evolução no tempo dos parâmetros acústicos.

	c (m/s)	β (dB/cm-MHz)	B/A	IBC(σ) ($\text{cm}^{-1}\text{sr}^{-1}$)
Média	1354	1.31	7.81	1.54×10^{-4}
Desvio	4.97	0.32	2.01	1.31×10^{-4}

Finalmente, neste estudo observou-se que existe uma forte dependência sobre o tipo e tamanho da janela selecionada na estimativa da PSD para os ecos de ultrassom. Alterações nos espectros implicam mudanças nos valores dos parâmetros acústicos, somando-se a isto uma série de imprecisões entre as quais destaca-se o

alinhamento do feixe de ultra-som. Na avaliação quantitativa de cada parâmetro foi observado que o refletor utilizado é importante na análise comparativa, pois este produz a reflexão especular, usada como sinal de referência no método de divisão espectral.

Embora os resultados obtidos mediante este método fornecem boas aproximações e minimizam os erros devidos a fatores dependentes do equipamento de medição como abertura do transdutor, resposta eletromecânica; as estimativas por este método tornam-se muito dependentes da referência e impedem extrapolar aplicações do método *in vivo*. A obtenção de valores absolutos de parâmetros acústicos mediante inspeção ultra-sônica é complexa, pois os valores estimados vão depender das condições e características do campo acústico, potência do feixe, equipamentos utilizados e propriedades acústicas do referencial usado para corrigir os valores obtidos de um meio avaliado. (WANGA e SHUNG,1997).

Capítulo 6

CONCLUSÕES

Neste estudo foi implementada uma metodologia para determinar as variações dos parâmetros acústicos em uma região de interesse de uma mistura líquida, a qual se separa no tempo em suas fases originais. O estudo inicialmente determinou valores dos parâmetros acústicos para cada um dos líquidos que compõem o líquido total em estudo. Os resultados obtidos para cada líquido denominado A e B apresentaram coerência em relação a valores de parâmetros acústicos de substâncias líquidas encontrados na literatura com propriedades acústicas e densidades semelhantes aos usados neste estudo. Sendo assim, a metodologia foi aplicada para a mistura dos óleos A e B denominada por convenção de emulsão bifásica e foram registradas curvas com valores variantes no tempo para parâmetros como atenuação acústica β e B/A. Variações de 49.56% para β e 51% para B/A foram determinadas em relação a valores dos parâmetros no início da emulsificação. O estudo conclui que variações das características heterogêneas em um material podem influenciar dramaticamente os valores de parâmetros acústicos como visto neste estudo especialmente durante os instantes da quebra da emulsão, a qual induz um fator atenuante maior que a atenuação causada pela dispersão de

gotículas. No entanto, o tamanho e a quantidade de partículas dispersas não influenciaram dramaticamente mudanças nos valores de não linearidade e β .

A reflexibilidade do material na ROI quantificada mediante as curvas paramétricas de atenuação e B/A, descreveram o comportamento e a evolução da emulsão durante o tempo. Essas informações podem ser utilizadas para monitorar o processo de estabilização das fases da emulsão. Assim, foi visto que o instante onde se apresenta o maior valor de atenuação, indica o início do processo da formação da interface na ROI.

Percebeu-se durante os primeiros instantes do processo de separação comportamentos contrários do B/A e β , notando uma leve diminuição do valor B/A de acordo com a mínima tendência de incremento do β . A curva do IBC permitiu interpretar que valores relativamente altos de espalhamento de energia supõem o estado emulsificado do meio e de forma contrária, valores mínimos percebidos na curva indicaram a tendência de estabilização das fases A e B. Isto devido às diminuições de gotículas de óleo dadas pela coalescência das gotículas na ROI.

As variações dos parâmetros possuem uma relação com a heterogeneidade do meio. Tais variações são mais significativas quando as características de reflexibilidade do meio são dadas por grandes diferenças de impedância. Isto foi notado devido ao fato que, embora o tamanho e a distribuição das partículas (gotículas) no início do processo de emulsificação mudam notoriamente (com o incremento do tamanho das gotículas entre 1 mm a 3 mm aproximadamente), a faixa de variação no tempo para os parâmetros B/A e β são relativamente mínimas com percentagens de 14.55% e 19.60% respectivamente. Neste estudo a velocidade não foi significativa na caracterização da natureza instável da emulsão devido a sua mínima variação sendo que a resistência à propagação da onda não afetou

dramaticamente o perfil da velocidade na emulsão durante o processo de separação.

6.1. SUGESTÃO

A caracterização paramétrica para estudos futuros em preferência deveria envolver a inspeção ultrassônica do meio de interesse em vez de avaliar uma só região, desse modo seria possível obter um melhor entendimento da resposta do meio total à excitação de ultra-som afim de avaliar propriedades e características com maior profundidade. A análise espectral fornece uma ótima ferramenta na análise quantitativa do meio e incentiva a seguir utilizando-a na caracterização de materiais. Sugere-se que para futuras avaliações de materiais o espectrograma seja considerado como ferramenta para a construção de um mapa paramétrico que permita representar e descrever o meio a partir da reflexibilidade com o ultra-som. A estimativa dos parâmetros depende da estimativa da PSD, portanto o tamanho da janela é fundamental na representação do conteúdo espectral de um eco de ultra-som. Como os ecos destes meios com características heterogêneas podem apresentar certas distorções no sinal refletido, a largura do sinal distorcido é variante. Muitas vezes se desconhece o tamanho adequado que deveria ser utilizado para determinar o espectro do sinal o qual torna-se mais imprevisível com meios variantes no tempo. Portanto, é sugerido a implementação de uma sub-rotina para escalar a janela aplicada na estimativa da PSD.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLER, J.C. (1977). Over view of tissue characterization. **Proceedings Ultrasonics symposium: National Science Foundation**, Washington D.C., p.226 – 229.

BAMBER, J. C. (1986). Speed of sound Physical Principles of Medical. **Ultrasonics ed CR Hill(Chichester: Ellis Horwood)**. p. 200-224.

BAMBER, J. C. (1998) . Ultrasonic proprieties of tissues. **Ultrasound In Medicine** IOP.

BEVER, R.T.(1959). Parameter of nonlinearity in fluids. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 32, n. 6, p. 719 – 721

BEYER, R.T; LETCHER, S.V. (1969). Physical Ultrasonics. **Academic Press**, New York.

BJØRNØ, L. (1986). Characterization of biological media by means of their non-linearity. **Ultrasonic**, v. 24, p. 254 – 259.

BJØRNØ, L. (2002). Forty years of nonlinear ultrasound. **Ultrasonics**, Slangerup, Denmark ,v 40, p.11 – 17.

CAIN, C.A.; NISHIYAMA, H.; KATAKURA, K. (1986). On ultrasonic methods for measurement of the nonlinear parameter B/A in fluid-like media. **J. Acoust. Soc. Am.**,v.80, n.2, p. 685-688.

COHEN L. (1995). Time - frequency analysis. New Jersey : Prentice Hall PTR.

COUPLAND, J.N.; McCLEMENTS, J.D. (2000). Droplet size determiantion in food emulsion: comparison of ultrasonic and light scattering methods. **Journal of Food Engineering**, v.50, p. 117 – 120.

DEMPSEY, P.J.(2004). The history of breast ultrasound. **J Ultrasound Méd**, Houston, V.23, p.887– 894.

DONG, F., MADSEN, E.L., MACDONALD, M.C. AND ZAGZEBSKI, J.A. (1999). Nonlinearity parameter for tissue-mimicking materials. **Ultrasound in Med. & Biol**, USA, v 25, n 5, p. 831-838.

DUCK, F. A.; BAKER, A.C.; STARRITT, H C. (1998). **ULTRASOUND IN MEDICINE**. IoP.

DUKHIN A.S. AND GOETZ P.J. (2002). Ultrasound for characterizing colloids. Particle sizing, zeta potential, rheology. **Elsevier**, New York.

DUKHIN, A.S.; GOETZ, P.J. AND TRAVERS, B. (2005). Use of ultrasound for characterizing dairy products. **Journal of Dairy Science**, New York, v. 88, n. 4, 2005, p. 1320 –1334.

DUNN, F.; LAW, W. K.; FRIZZELL, L.A. (1981). Nonlinear ultrasonic wave propagation in biological materials. **Proceedings of Ultrasonics symposium**, p.527-532.

DUNN, F. (1986). The ultrasonic nonlinearity parameter of biological media and its dependence on tissue structure. **Ultrasound in Medicine and Biology**, v. 12, n. 9.

FJELLESTAD H. (2000). Simulation of nonlinear ultrasound fields mathematical modeling.123f. (Degree) - University of Oslo, Oslo, 2000.

FUJII, Y.; TANIGUCHI, N.; ITOH, K.; SHIGETA, K.; WANG, Y.; TSAO, J.W.; KUMASAKI, K.; ITOH, T. (2002). A New Method for Attenuation Coefficient Measurement in the Liver Comparison With the Spectral Shift Central Frequency Method. **J Ultrasound Med**. v. 21, n. 783-788.

GARRA, B.S.; INSANA, M.F.; SHAWKER, T.H.; RUSSELL, M.A. (1987). Quantitative Estimation of Liver Attenuation and Echogenicity: Normal State versus Diffuse Liver Disease. **Radiology**, v.162, p. 61-67.

GIBSON, D. (1989). **Ultrasonic tissue characterization of myocardium**. In: Sutton MSJ, Oldershaw PJ (ed.) Textbook of adult and pediatric echocardiographic and Doppler. Cambridge: Blackwell Scientific Publication, Inc., p 545-54.

GREELEAF, J.F. (1986). Tissue characterization with ultrasound. **Crc Press**. 2v.Livros.U.S.A. p. 15 – 55.

HALL, C.S.; MARSH, J.N; HUGHES, M.S.; MOBLEY, J.; WALLACE, K.D.; MILLER, J.G.; BRANDENBURGER, G.H. (1996). Broadband measurements of the attenuation coefficient and backscatter coefficient for suspensions: A potential calibration tool. **J. Acoust. Soc. Am.**, v.101,n. 2. p. 1162-1171.

HE, P. (1998). Acoustic parameter estimation based on attenuation and dispersion measurements. Proceedings - **20th Annual International Conference - IEEE/EMBS**. Hong Kong.

HIGUTI, R.T., BACANELI, F., FURUKAWA, C.M. AND ADAMOWSKI, J.C. (1999). Ultrasonic Characterization of Emulsions: Milk and Water in Oil, Proceeding of **Ultrasonic Symposium**, São Paulo, Brazil, p. 779 – 782.

HOOD, A. (2000). **The state equation**. Disponível em:<<http://www-solar.mcs.st-and.ac.uk/~alan/MT3601/Fundamentals/node21.html>>.Acesso em 21 de mai.2007.

INSANA, M.F.; ZAGZEBSKI, J.A.; MADSEN, E.L. (1982). Acoustic backscattering from ultrasonically tissuelike media. **Med. Phys.**, v. 9, n. 6., p. 848-855.

INSANA, M.F., BROWN, D.G. (1992). Acoustic scattering theories applied to biological tissues. (A). **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 91, n. 4, p. 2406 .

KELLY-FRY E, KOSSOFF G, HINDMAN HA.(1972). The potential of ultrasound visualization for detecting the presence of abnormal structures within the female breast. Proceedings of the IEEE **Ultrasonic Symposium**. New York, NY, p.25 30.

KOURTICHE, D., ALLIES, L., CHITNALAH, A.; NADI, M. (2001) Harmonic propagation of finite amplitude sound beams: comparative method in pulse echo measurement of nonlinear B/A parameter. **Meas.Sci.Technol.**, Vandoeuvre, France, v.12, p.1990-1995.

KRUGER, S.E.; MACHADO, J.; REBELLO, A.; CHARLIE, J.(2004). Broadband Ultrasonic Backscattering Applied to Nondestructive Characterization of Materials. **IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 51, n. 7, p. 831-837.

KUC, R. AND SCHWARTZ, M. (1979). Estimating the acoustic attenuation coefficient slope for liver from reflected ultrasound signals. **IEEE transactions on sonics and ultrasonics**, New York, v. 26, n. 5.

LABAT, V.; REMENIERAS, J.P.; MATAR, B.O.; OUAHABI, A. AND PATAT, F. (2000). Harmonic propagation of finite amplitude sound beams: experimental determination of the nonlinearity parameter B/A. **Ultrasonics**, France, v. 38, p. 292 – 296.

LEBERTRE, M. ; OSSANT, F. ; VAILLANT, L. ; DIRIDOLLOU, S. ; PATAT, P. (2002). Spatial variation of acoustic parameters in human skin: an *in vitro* study between 22 and 45 MHz. **Ultrasound in Med. & Biol.**, France, v. 28, n. 5, p. 599–615.

LEBERTRE, M. ; OSSANT, F. ; VAILLANT, L. ; DIRIDOLLOU, S. ; PATAT, P. (2000). Human Dermis Ultrasound Characterization: Backscattering Parameters Between 22-45 MHz. **Proceedings Ultrasonics Symposium**, p.1371-1374.

MACHADO, J.C.; FOSTER, F.S. (2001). Ultrasonic Integrated Backscatter Coefficient Profiling of Human Coronary Arteries *In Vitro*. **IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.**, v.48, n. 1, p. 17-27.

McCLEMENTS, D. J. (1995). Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing. **Trends in Food Science & Technology**, v. 61, p.293-299.

McCLEMENTS, D. J. ; POVEY, M. J. W. (1987). Ultrasonic velocity as a probe of emulsions and suspensions. **Elsevier Science Publishers B.V.**, Amsterdam - Printed in The Netherlands. *Advances in Colloid and Interface Science*, v.27, p. 285-316.

MO, L.Y.; COBBOLD, R.S. (1993). Theoretical models of ultrasonic scattering in blood. **by CRC Press, Inc.**

NETA, M. (2007). **2ª Lei de Newton - Lei Fundamental da Dinâmica**. <<http://web.educam.pt/fq/dinamica/newton2.htm>>. Acesso em: 21 mai. 2007.

ONDACORPORATION. (2006) LAUST PEDERSEN. Disponível em: <http://www.ondacorp.com/tecref_acoustictable.html>. Acesso em: 28 Ags. 2007

OPHIR, J.; MAKLAD, N.F. AND BIGELOW, R.H. (1982). Ultrasonic attenuation measurements of in vivo human muscle. **Ultras. Imag.**, 4, 290 – 295.

PAZIN, A.; SCHMIDT, A.; ALMEIDA, O.C.; MARIN, J. A.; MACIEL, B. C. (2003). Caracterização ultra-sônica tecidual miocárdica. **Arq Bras Cardiol**, v. 81 n. 3, pp. 319 – 25.

PELHAM, J. R.; GALT, J.K. (1946). Ultrasonics propagation in liquids: I. Application of pulse technique to velocity and absorption measurements at 15 megacycles. **J. Acoustic. Soc. Am.**, v.14, p. 608-14.

POVEY, M.J. (1997). Ultrasonic Techniques for fluids Characterization. U.S.A. Academic **Press**.

REDDY, S. R.; FOGLER, H. S. (1979). Emulsion Stability of Acoustically Formed Emulsions. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 84, n.12.

REID, J.M. (1993). Standard substitution methods for measuring ultrasonic scattering tissues. **by CRC Press, Inc.**

ROBERJOT, V.; BRIDAL, S.L.; LAUGIER, P.; BERGER, G. (1996). Absolute Backscatter Coefficient over a of Frequencies in a Tissue - Containing Two Populations of Scatterers. **IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 43, n. 5. p. 970-978.

SHUNG, K.K; THIEME, G.A; Ultrasonic scattering in biological tissues. garra, b.s. in vivo liver splenic tissue characterization by scattering. **Crc Press**. Cap. 11, 347–386.

TAL-FIGIEL, B. (2007). The Formation of Stable W/O, O/W, W/O/W Cosmetic Emulsions in an Ultrasonic Field. **Electronic ISSN: 1744-3563**, v.85, p. 730-734.

TREECE, G.M., PRAGER, R.W. AND GEE, A.H. (2005). Ultrasound Attenuation Measurement in the Presence of Scatterer Variation. **Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions**, v. 52, n. 12, pp. 2346 – 2360.

WALSTRA, P. (1993). Principles of emulsion formation. *Chemical Engineering Science*, v. 48, n. 2, p. 333-349.

WANG, S.H.; SHUNG, K.K. (1997). An Approach for Measuring Ultrasonic Backscattering from Biological Tissues with Focused Transducers. **IEEE Transactions On Biomedical Engineering**, v. 44, n. 7, p. 549-554.

WU, J.; TONG, J. (1997). Measurements of nonlinearity parameter B/A of agent of contrast. **Ultrasound in Medicine and Biology**, v 24,n.1, p.153 - 159.

YONGCHEN,S.;YANWU, D.;JIE,T. AND ZHENSHENG,T. (1986).Ultrasonic propagation parameters in human tissues. **Proceedings of Ultrasonics symposium**, p.905-908.

YONGCHEN, S.; YANUU, D.; HENGYUAN, Z. (1985). Study of the acoustic nonlinearity parameter in high attenuation biological media. **Proceedings of Ultrasonics symposium**, p. 891-894.

ZAGZEBSKI, J.A. (1996). **Essentials of ultrasound physics**. Mosby, Inc. USA

ZHANG, J., KUHLENSCHMIDT, M.K., DUNN, F. (1991). Influences of structural factors of biological media on the acoustic nonlinearity parameter B/A. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 89, n 1, p. 80–91.

ZHENG, Y.; MAEV, R. GR. AND SOLODOV, I. Y. (1999). Nonlinear acoustic applications for material characterization: A review. **Can. J. Phys.**, v. 77, p. 927-967.