

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ

DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENADORIA DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA

DISSERTAÇÃO

APLICAÇÃO DE TRANSFORMADA WAVELET NO PROCESSAMENTO DE SINAIS ULTRA-
SÔNICOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS AR-ÁGUA

Wanderley Freitas Lemos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM TECNOLOGIA

Maurício Saldanha Motta, D.Sc.
Orientador

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
DEZEMBRO / 2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

SUMÁRIO

	Pág.
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
I.1- HISTÓRICO	3
I.2- TRANSFORMADA DE FOURIER	10
I.3- TRANSFORMADA DE FOURIER X TRANSFORMADA WAVELET	14
I.3.1- Características da transformada de Fourier	15
I.3.2- Transformada de Gabor	15
I.4- TRANSFORMADA WAVELET	16
I.4.1- Conceitos gerais	17
I.4.1.1- Aplicações	17
I.4.1.2- Espaços vetoriais	18
I.4.1.3- Bases wavelets	21
I.4.1.3.1- Base ortogonal	21
I.4.1.3.2- Base biortogonal	22
I.4.2- Análise wavelet	22
I.4.2.1- Coeficiente de escala	22
I.4.2.2- Coeficiente de posição	24
I.4.2.3- Coeficiente wavelet	25
I.4.2.4- Correlação de sinais	26
I.4.3- Famílias wavelets	28
I.4.3.1- Wavelets discretas	28
I.4.3.2- Wavelets contínuas	30
I.4.4- Famílias wavelets contínuas	30
I.4.4.1- Wavelet de Daubechies	31
I.4.4.2- Wavelet Biortogonal	32
I.4.4.3- Wavelet Biortogonal Reversa	33
I.4.4.4- Wavelet de Coifman (Coiflet)	35
I.4.4.5- Wavelet simétrica (Symlet)	35
I.4.4.6- Wavelet de Morgan (Morlet)	36
I.4.4.7- Wavelet chapéu mexicano(Mexican Hat)	36

	Pág
I.4.4.8- Wavelet de Meyer	37
I.4.4.9- Wavelet Gaussiana	37
I.4.5- Famílias wavelets diversas	38
I.4.5.1- Wavelet gaussiana complexa	38
I.4.5.2- Wavelet de Morgan Complexa	38
I.4.5.3- Wavelet de Shannon complexa	39
CAPÍTULO II - MATERIAIS E MÉTODOS	40
II.1- METODOLOGIA DE EXECUÇÃO	40
II.2- MONTAGEM DO PROTÓTIPO	41
II.3- GERAÇÃO DE ESCOAMENTO DE BOLHAS	42
II.4- TÉCNICA ULTRA-SÔNICA	47
II.4.1- Ultra-som	47
II.4.2- Campo ultra-sônico	47
II.4.3- Técnica pulso-eco	48
II.4.3.1- Eco frontal	49
II.4.3.2- Eco das bolhas	49
II.4.3.3- Eco de fundo	49
II.5- AQUISIÇÃO DE SINAL	50
II.5.1- Aquisição de sinal de eco de fundo sem bolhas	50
II.5.2- Aquisição de sinal de eco de fundo com bolhas	51
II.6- PROCESSAMENTO DE SINAIS	60
CAPÍTULO III - RESULTADOS	65
III.1- PROCESSAMENTO DE SINAIS SEM BOLHAS	65
III.2- PROCESSAMENTO DE SINAIS COM BOLHAS	66
III.3- ANÁLISE DOS SINAIS SEM BOLHAS	78
III.3.1- Escolha das wavelets de desempenho diferenciado	78
III.3.2- Análise das wavelets de melhor desempenho	79
III.4- ANÁLISE DOS SINAIS COM BOLHAS	79
III.4.1- Espectros de energia obtidos por análise Wavelet	80
III.4.2- Valores de espectros de energia por Wavelet de Daubechies	80

	Pág.
III.5- VARIÁVEIS DE CARATERIZAÇÃO DE ESCOAMENTO BIFÁSICO	90
CAPÍTULO IV - DISCUSSÃO	92
IV.1- A RELAÇÃO SINAL x RUÍDO	92
IV.2- VALORES MÁXIMOS DE ESPECTROS DE ENERGIA DOS SINAIS	94
IV.3- GRÁFICOS DAS AMPLITUDES DOS ESPECTROS DE ENERGIA	113
IV.3.1- Gráficos das amplitudes dos espectros de energia x diâmetro	113
IV.3.2- Gráficos das amplitudes dos espectros de energia x vazão	114
IV.3.3- Gráficos dos demais parâmetros em função do diâmetro	116
IV.3.4- Gráficos dos demais parâmetros em função da vazão	119
IV.3.5- Análise em função dos valores médios	123
CONCLUSÃO	128
RECOMENDAÇÕES	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130

Ficha Catalográfica elaborada pela biblioteca Central do CEFET-RJ

S237 Lemos, Wanderley Freitas.

Aplicação de transformada Wavelet no processamento de sinais ultra-sônicos para caracterização de escoamentos bifásicos ar-água / Wanderley Freitas Lemos. – 2007.

xix, 133 f.: il.color., tabs.; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2007.

Bibliografia: f. 130-133.

1. Testes de ultra-som. 2. Transformada Wavelet. 3. Escoamento bifásico. I. Título.

CDD 620.11274

À minha esposa e filhos.

Agradecimentos

- Ao professor Maurício S. Motta (D.Sc.), pelo empenho no trabalho de orientação, dedicação e incentivo, que muito contribuíram para a elaboração deste trabalho.
- Ao professor Juarez J.O. Filho (M.Sc), pelo apoio na transformação dos sinais de aquisição plotados em planilhas Excell para sinais uni-dimensionais em MatLab.
- Ao professor Maj.Galdino (D.Sc.), do IME-RJ, pelas informações a respeito de Wavelets.
- À professora Tânia Maria Marinho (D.Sc), pela iniciação em Metodologia Científica e Filosofia.
- Ao professor Álvaro Luiz Stelle (D.Sc.), da UTF-PR, pela cessão de material técnico.
- Ao professor Leandro dos Santos Coelho (D.Sc.), da PUC-PR, por informações sobre aplicativos Wavelet no MATLAB;
- Ao professor Luis Oscar Henriques (D.Sc), pelo apoio no software MatLab.
- À professora Maria Lúcia Lamassa, a primeira professora.
- À professora Gisele Cohen, pelo apoio na Língua Inglesa.
- Aos funcionários Abraão Ferreira e Bráulio Tito, pela dedicação e presteza.
- Aos professores do Curso de Mestrado em Tecnologia.
- Aos funcionários do CEFET-RJ e da UnED-NI, pelo incentivo.
- Aos alunos do mestrado pelo companheirismo;
- Aos colegas, que direta ou indiretamente, através dos incentivos contribuíram para o término da dissertação.
- Aos meus pais, pelo amor e dedicação, responsáveis diretos pela minha educação profissional, acadêmica, ética, moral e religiosa.
- Aos meus irmãos e demais familiares, pelo constante incentivo, em toda a trajetória acadêmica e profissional de minha vida.

Ao Ser Supremo, que rege todo o Universo, responsável pelo suporte espiritual indispensável à transposição das difíceis barreiras da vida.

Resumo da dissertação submetida ao PPTEC/CEFET-RJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Tecnologia (M.T.)

APLICAÇÃO DE TRANSFORMADA WAVELET NO PROCESSAMENTO DE SINAIS
ULTRA-SÔNICOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS
AR-ÁGUA

Wanderley Freitas Lemos

Dezembro de 2007

Orientador: Maurício Saldanha Motta, DSc.

Departamento: PPTEC

A proposta apresentada é a aplicação da Transformada Wavelet, como ferramenta matemática alternativa no processamento de sinais ultra-sônicos de eco de fundo, dentro da linha de pesquisa do **CEFET-RJ**, para caracterização de escoamentos bifásicos do tipo ar-água. Os diversos escoamentos bifásicos foram gerados a partir da combinação de vazões de ar e diâmetros dos correspondentes orifícios de saída destas vazões, com insuflamento numa coluna vertical de água. Para cada tipo de escoamento foi executado o processamento do sinal de aquisição, através da caixa de ferramentas Wavelets Toolbox integrante do MATLAB, gerando os espectros de energia dos resíduos resultantes da filtragem dos referidos sinais. Os valores máximos de amplitudes de resíduos para cada tipo de escoamento ensaiado foram correlacionados em função de vazões e diâmetros, obtendo-se os gráficos de caracterização do escoamento. Este método mostrou-se eficiente e alcançou o objetivo proposto, ao ser comparado com o método de caracterização de escoamento através da densidade de bolhas, quantidade de bolhas e seção esférica transversal de bolhas, também em função das mesmas vazões e diâmetros.

Palavras-chave: Caracterização de escoamento bifásico; Wavelet; Técnica ultra-sônica.

Abstract of dissertation submitted to PPTEC/CEFET-RJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Technology (M.T.).

WAVELET TRANSFORM APPLICATION IN ULTRASONICS SIGNALS PROCESSING TO BI-PHASE FLOW CHARACTERIZATION

Wanderley Freitas Lemos

2007 / December

Supervisor: Maurício Saldanha Motta, D.Sc.

Department: PPTEC

The proposal presented is the Wavelet Transform application, as an alternative mathematical tool to backsterrred ultrasonic signal processing included in the research approach of CEFET-RJ that consists in the bi-phase flows characterization of air-water type. The several bi-phase flows were generated by the combination of correspondent diameter and air outflow openings with air supply inside a water vertical column. For each flow type it was used the processing of acquisition signal through Wavelet Toolbox that is a device inside MATLAB, generating energy spectrums of residuals resulted of the denoising of such signals. The maximum values of residuals' amplitude to each flow were correlated by diameters and flows, getting flow resulting in characterization graphics of these flows. This method was considered efficient and reached its goal while compared to the characterization method through bubbles density, bubbles quantity and bubbles transversal spherical section also related to the same flows and diameters.

Keyword: Bi-phase flow characterization; Wavelet; Ultrasonic technical.

Lista de Figuras

	Pág.
Figura I.1 - Processamento de sinal por TF	3
Figura I.2 - Representação de sinal por TF	3
Figura I.3 - Representação de escalas e posições	4
Figura I.4 - Amostragem de sinal por janelas	4
Figura I.5 - Representação da wavelet de Haar	5
Figura I.6 - Representação de sinal por Shannon	5
Figura I.7 - Representação de sinal por Gabor	6
Figura I.8 - Representação de sinal por STFT	6
Figura I.9 - Representação de sinal por escala	7
Figura I.10 - Representação de sinal por Wavelet	7
Figura I.11 - Algoritmo de decomposição de sinal por Wavelet	8
Figura I.12 - Algoritmo de análise de sinal por Wavelet	8
Figura I.13 - Algoritmo de decomposição / reconstrução de sinal	9
Figura I.14 - Algoritmo de decomposição de sinal	9
Figura I.15 - Equiparação de energias de sinais	11
Figura I.16 - Funções básicas da Transformada de Gabor	16
Figura I.17 - Comparação de escalas em wavelet	23
Figura I.18 - Exemplo de variação de sinal senoidal	23
Figura I.19 - Exemplo de compressão de wavelet mãe	24
Figura I.20 - Exemplo de deslocamento da wavelet mãe	24
Figura I.21 - Abertura de janela de um sinal por wavelet	25
Figura I.22 - Deslocamento de janela com mesmo coeficiente	25
Figura I.23 - Abertura de janela com coeficiente diferente	26
Figura I.24 - Wavelets Daubechies 2 e 7	26
Figura I.25 - Wavelets Coiflet 1 e Gauss 4	27
Figura I.26 - Wavelets Gauss Complexa 6 e Shannon 0,5 -1	27
Figura I.27 - Análise discreta de sinal	29
Figura I.28 - Análise contínua de sinal	30
Figura I.29 - Família Daubechies	31

	Pág.
Figura I.30 - Biortogonal 1.3	32
Figura I.31 - Biortogonal 1.5	32
Figura I.32 - Biortogonal 2.2	32
Figura I.33 - Biortogonal 2.4	32
Figura I.34 - Biortogonal 2.6	32
Figura I.35 - Biortogonal 2.8	32
Figura I.36 - Biortogonal 3.1	33
Figura I.37 - Biortogonal 3.3	33
Figura I.38 - Biortogonal 3.5	33
Figura I.39 - Biortogonal 3.7	33
Figura I.40 - Biortogonal 3.9	33
Figura I.41 - Biortogonal 4.4	33
Figura I.42 - Biortogonal 5.5	33
Figura I.43 - Biortogonal 6.8	33
Figura I.44 - Biortogonal Reversa 1.3	34
Figura I.45 - Biortogonal Reversa 1.5	34
Figura I.46 - Biortogonal Reversa 2.2	34
Figura I.47 - Biortogonal Reversa 2.4	34
Figura I.48 - Biortogonal Reversa 2.6	34
Figura I.49 - Biortogonal Reversa 2.8	34
Figura I.50 - Biortogonal Reversa 3.1	34
Figura I.51 - Biortogonal Reversa 3.3	34
Figura I.52 - Biortogonal Reversa 3.5	34
Figura I.53 - Biortogonal Reversa 3.7	34
Figura I.54 - Biortogonal Reversa 3.9	35
Figura I.55 - Biortogonal Reversa 4.4	35
Figura I.56 - Biortogonal Reversa 5.5	35
Figura I.57 - Biortogonal Reversa 6.8	35
Figura I.58 - Família Wavelet de Coifman (Coiflet)	35

	Pág.
Figura I.59 - Família Wavelet Simétrica (Symlet)	36
Figura I.60 - Família Wavelet de Morgan (Morlet)	36
Figura I.61 - Wavelet Chapéu Mexicano (Mexican Hat)	37
Figura I.62 - Wavelet de Meyer	37
Figura I.63 - Wavelet Gaussiana	37
Figura I.64 - Wavelet Gaussiana Complexa	38
Figura I.65 - Wavelet de Morgan Complexa	39
Figura I.66 - Wavelet de Shannon Complexa	39
Figura II.1 - Visão geral do protótipo	40
Figura II.2 - Esquemático do protótipo	41
Figura II.3 - Simulação de geração de bolhas	42
Figura II.4 - Representação de escoamentos bifásicos em condutos verticais	43
Figura II.5 - Simulação de escoamento bifásico em conduto vertical	43
Figura II.6 - Escoamento das bolhas Vazão variável x Diâmetro $D=0,45\text{mm}$	44
Figura II.7 - Escoamento das bolhas Vazão variável x Diâmetro $D=0,55\text{mm}$	45
Figura II.8 - Escoamento das bolhas Vazão variável x Diâmetro $D=0,70\text{mm}$	46
Figura II.9 - Escoamento das bolhas Vazão variável x Diâmetro $D=0,80\text{mm}$	47
Figura II.10 - Representação de ecos de fundo	49
Figura II.11 - Diagrama esquemático do sistema de aquisição de sinal	50
Figura II.12 - Aquisição de eco frontal e de fundo do sinal sem bolhas	51
Figura II.13 - Forma de onda do sinal sem bolhas	51
Figura II.14 - Forma de onda do sinal 04 - 04	52
Figura II.15 - Forma de onda do sinal 05 - 04	52
Figura II.16 - Forma de onda do sinal 06 - 04	53
Figura II.17 - Forma de onda do sinal 07 - 04	53
Figura II.18 - Forma de onda do sinal 08 - 04	53
Figura II.19 - Forma de onda do sinal 04 - 05	54
Figura II.20 - Forma de onda do sinal 05 - 05	54
Figura II.21 - Forma de onda do sinal 06 - 05	55

	Pág.
Figura II.22 - Forma de onda do sinal 07 - 05	55
Figura II.23 - Forma de onda do sinal 08 - 05	55
Figura II.24 - Forma de onda do sinal 04 - 07	56
Figura II.25 - Forma de onda do sinal 05 - 07	56
Figura II.26 - Forma de onda do sinal 06 - 07	57
Figura II.27 - Forma de onda do sinal 07 - 07	57
Figura II.28 - Forma de onda do sinal 08 - 07	57
Figura II.29 - Forma de onda do sinal 04 - 08	58
Figura II.30 - Forma de onda do sinal 05 - 08	58
Figura II.31 - Forma de onda do sinal 06 - 08	59
Figura II.32 - Forma de onda do sinal 07 - 08	59
Figura II.33 - Forma de onda do sinal 08 - 08	59
Figura II.34 - Interface Gráfica Wavelet Toolbox	60
Figura II.35 - Forma de onda do sinal carregado	61
Figura II.36 - Análise multi-freqüência do sinal	62
Figura II.37 - De-noise e descontinuidade do sinal ensaiado	63
Figura II.38 - Análise estatística dos Resíduos	64
Figura III.1 - Quadro resumo da caracterização de escoamento bifásico	91
Figura IV.1 - Probabilidade sinal / ruído	93
Figura IV.2 - Árvore de decisão sinal / ruído	93
Figura IV.3 - Amplitude x Vazão D=0,45 mm Escala logarítmica	96
Figura IV.4 - Amplitude x Vazão D=0,45 mm Escala linear	96
Figura IV.5 - Amplitude x Vazão D=0,55 mm Escala logarítmica	98
Figura IV.6 - Amplitude x Vazão D=0,55 mm Escala linear	98
Figura IV.7 - Amplitude x Vazão D=0,70 mm Escala logarítmica	100
Figura IV.8 - Amplitude x Vazão D=0,70 mm Escala linear	100
Figura IV.9 - Amplitude x Vazão D=0,80 mm Escala logarítmica	102
Figura IV.10 - Amplitude x Vazão D=0,80 mm Escala linear	102
Figura IV.11 - Amplitude x Diâmetro V=0,40 lpm Escala logarítmica	104

	Pág.
Figura IV.12 - Amplitude x Diâmetro $V=0,40$ lpm Escala linear	104
Figura IV.13 - Amplitude x Diâmetro $V=0,50$ lpm Escala logarítmica	106
Figura IV.14 - Amplitude x Diâmetro $V=0,50$ lpm Escala linear	106
Figura IV.15 - Amplitude x Diâmetro $V=0,60$ lpm Escala logarítmica	108
Figura IV.16 - Amplitude x Diâmetro $V=0,60$ lpm Escala linear	108
Figura IV.17 - Amplitude x Diâmetro $V=0,70$ lpm Escala logarítmica	110
Figura IV.18 - Amplitude x Diâmetro $V=0,70$ lpm Escala linear	110
Figura IV.19 - Amplitude x Diâmetro $V=0,80$ lpm Escala logarítmica	112
Figura IV.20 - Amplitude x Diâmetro $V=0,80$ lpm Escala linear	112
Figura IV.21 - Amplitude x Diâmetro Escala logarítmica	113
Figura IV.22 - Amplitude x Diâmetro Escala linear	114
Figura IV.23 - Amplitude x Vazão Escala logarítmica	115
Figura IV.24 - Amplitude x Vazão Escala linear	115
Figura IV.25 - Densidade de bolhas x Diâmetro Escala logarítmica	116
Figura IV.26 - Densidade de bolhas x Diâmetro Escala linear	117
Figura IV.27 - Quantidade de bolhas x Diâmetro Escala logarítmica	117
Figura IV.28 - Quantidade de bolhas x Diâmetro Escala linear	118
Figura IV.29 - Seção esférica x Diâmetro Escala logarítmica	118
Figura IV.30 - Seção esférica x Diâmetro Escala linear	119
Figura IV.31 - Densidade de bolhas x Vazão Escala logarítmica	120
Figura IV.32 - Densidade de bolhas x Vazão Escala linear	120
Figura IV.33 - Quantidade de bolhas x Vazão Escala logarítmica	121
Figura IV.34 - Quantidade de bolhas x Vazão Escala linear	121
Figura IV.35 - Seção esférica x Vazão Escala logarítmica	122
Figura IV.36 - Seção esférica x Vazão Escala linear	122
Figura IV.37 - Amplitude média x Diâmetro Escala logarítmica	123
Figura IV.38 - Densidade média x Diâmetro Escala logarítmica	124
Figura IV.39 - Quantidade média x Diâmetro Escala logarítmica	124
Figura IV.40 - Seção média x Diâmetro Escala logarítmica	125

	Pág.
Figura IV.41 - Amplitude média x Vazão Escala logarítmica	126
Figura IV.42 - Densidade média x Vazão Escala logarítmica	126
Figura IV.43 - Quantidade média x Vazão Escala logarítmica	127
Figura IV.44 - Seção média x Vazão Escala logarítmica	127

Lista de Tabelas

	Pág.
Tabela I.1 - Comparação entre Análise Contínua e Discreta	28
Tabela II.1 - Identificação dos códigos dos sinais de aquisição D=0,45 mm	52
Tabela II.2 - Identificação dos códigos dos sinais de aquisição D=0,55 mm	54
Tabela II.3 - Identificação dos códigos dos sinais de aquisição D=0,70 mm	56
Tabela II.4 - Identificação dos códigos dos sinais de aquisição D=0,80 mm	58
Tabela III.1 - Sinal sem bolhas	65
Tabela III.2 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,45 mm Fixo Wavelet Db 2 N7	66
Tabela III.3 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,55 mm Fixo Wavelet Db 2 N7	66
Tabela III.4 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,70 mm Fixo Wavelet Db 2 N7	67
Tabela III.5 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,80 mm Fixo Wavelet Db 2 N7	67
Tabela III.6 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,45 mm Fixo Wavelet Db 3 N7	67
Tabela III.7 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,55 mm Fixo Wavelet Db 3 N7	68
Tabela III.8 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,70 mm Fixo Wavelet Db 3 N7	68
Tabela III.9 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,80 mm Fixo Wavelet Db 3 N7	68
Tabela III.10 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,45 mm Fixo Wavelet Db 4 N7	69
Tabela III.11 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,55 mm Fixo Wavelet Db 4 N7	69
Tabela III.12 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,70 mm Fixo Wavelet Db 4 N7	69
Tabela III.13 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,80 mm Fixo Wavelet Db 4 N7	70
Tabela III.14 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,45 mm Fixo Wavelet Db 5 N7	70
Tabela III.15 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,55 mm Fixo Wavelet Db 5 N7	70
Tabela III.16 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,70 mm Fixo Wavelet Db 5 N7	71
Tabela III.17 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,80 mm Fixo Wavelet Db 5 N7	71
Tabela III.18 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,45 mm Fixo Wavelet Db 6 N7	71
Tabela III.19 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,55 mm Fixo Wavelet Db 6 N7	72
Tabela III.20 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,70 mm Fixo Wavelet Db 6 N7	72
Tabela III.21 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,80 mm Fixo Wavelet Db 6 N7	72
Tabela III.22 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,45 mm Fixo Wavelet Db 7 N7	73
Tabela III.23 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,55 mm Fixo Wavelet Db 7 N7	73
Tabela III.24 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,70 mm Fixo Wavelet Db 7 N7	73

	Pág.
Tabela III.25 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,80 mm Fixo Wavelet Db 7 N7	74
Tabela III.26 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,45 mm Fixo Wavelet Db 8 N7	74
Tabela III.27 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,55 mm Fixo Wavelet Db 8 N7	74
Tabela III.28 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,70 mm Fixo Wavelet Db 8 N7	75
Tabela III.29 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,80 mm Fixo Wavelet Db 8 N7	75
Tabela III.30 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,45 mm Fixo Wavelet Db 9 N7	75
Tabela III.31 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,55 mm Fixo Wavelet Db 9 N7	76
Tabela III.32 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,70 mm Fixo Wavelet Db 9 N7	76
Tabela III.33 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,80 mm Fixo Wavelet Db 9 N7	76
Tabela III.34 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,45 mm Fixo Wavelet Db 10 N7	77
Tabela III.35 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,55 mm Fixo Wavelet Db 10 N7	77
Tabela III.36 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,70 mm Fixo Wavelet Db 10 N7	77
Tabela III.37 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,80 mm Fixo Wavelet Db 10 N7	78
Tabela III.38 - Sinal 04 - 04	80
Tabela III.39 - Sinal 05 - 04	81
Tabela III.40 - Sinal 06 - 04	81
Tabela III.41 - Sinal 07 - 04	82
Tabela III.42 - Sinal 08 - 04	82
Tabela III.43 - Sinal 04 - 05	83
Tabela III.44 - Sinal 05 - 05	83
Tabela III.45 - Sinal 06 - 05	84
Tabela III.46 - Sinal 07 - 05	84
Tabela III.47 - Sinal 08 - 05	85
Tabela III.48 - Sinal 04 - 07	85
Tabela III.49 - Sinal 05 - 07	86
Tabela III.50 - Sinal 06 - 07	86
Tabela III.51 - Sinal 07 - 07	87
Tabela III.52 - Sinal 08 - 07	87
Tabela III.53 - Sinal 04 - 08	88

	Pág.
Tabela III.54 - Sinal 05 - 08	88
Tabela III.55 - Sinal 06 - 08	89
Tabela III.56 - Sinal 07 - 08	89
Tabela III.57 - Sinal 08 - 08	90
Tabela III.58 - Caracterização das bolhas em função dos níveis de escoamento	91
Tabela IV.1 - Variação de vazão e $D=0,45$ mm fixo	95
Tabela IV.2 - Variação de vazão e $D=0,55$ mm fixo	97
Tabela IV.3 - Variação de vazão e $D=0,70$ mm fixo	99
Tabela IV.4 - Variação de vazão e $D=0,80$ mm fixo	101
Tabela IV.5 - Variação de diâmetro e $V=0,40$ lpm fixa	103
Tabela IV.6 - Variação de diâmetro e $V=0,50$ lpm fixa	105
Tabela IV.7 - Variação de diâmetro e $V=0,60$ lpm fixa	107
Tabela IV.8 - Variação de diâmetro e $V=0,70$ lpm fixa	109
Tabela IV.9 - Variação de diâmetro e $V=0,80$ lpm fixa	111
Tabela IV.10 - Valores médios x Diâmetros	123
Tabela IV.11 - Valores médios x Vazões	125

Abreviaturas e Símbolos

Abreviatura / Símbolo	Significado	Unidade
ADW	Análise Discreta Wavelet	-
CEFET-RJ	Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca	-
END	Ensaio Não Destrutivo	-
IE	Integridade Estrutural	-
MT	Mestrado em Tecnologia	-
NDT	Non-Destructive Tests	-
OUS	Ondas Ultra-Sônicas	-
SUS	Sinais Ultra-Sônicos	-
STFT	Short-Time Fourier Transform	-
TF	Transformada de Fourier	-
TFCD	Transformada de Fourier de Curta Duração	-
TUS	Técnicas Ultra-Sônicas	-
TW	Transformada Wavelet	-
US	Ultra-Som	-

INTRODUÇÃO

A perspectiva de obtenção de um trabalho com relevante contribuição acadêmica, que pudesse incorporar uma idéia inovadora, influenciou decisivamente na escolha do assunto a ser abordado na área de **Ensaio Não Destrutivo (END)**, que se enquadrasse na linha de pesquisa em Integridade Estrutural do Mestrado em Tecnologia do **Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca do Rio de Janeiro (CEFET- RJ)**.

A base da pesquisa tecnológica utilizada foi calcada nos trabalhos de MELO[1] e CUNHA FILHO[2], que aplicaram técnicas ultra-sônicas para caracterização de escoamentos bifásicos ar-água, cujos experimentos concentraram-se na aquisição de sinal de eco de fundo, obtenção de imagens fotográficas das bolhas, e finalmente, plotagem da forma de onda do espectro de energia do sinal obtido através da aplicação da **Transformada de Fourier (TF)**.

A escolha de um assunto diferente, tendo como referência os trabalhos anteriores dentro da mesma linha de pesquisa e, ainda com o mesmo objetivo de obtenção da forma de onda do espectro de energia do sinal de eco de fundo, apresentava uma barreira a ser transposta. A solução para a inovação da pesquisa direcionava-se, então, para dois caminhos a escolher: simular a partir de um modelo diferente de **END** ou utilizar uma nova ferramenta matemática para a análise dos sinais obtidos. Em ambos os casos, com o objetivo de identificar escoamentos bifásicos em circuitos de refrigeração de reatores nucleares ou em qualquer outro equipamento utilizado em processo industrial e estabelecer as interrelações para caracterização dos mesmos, envolvendo tamanho das bolhas, diâmetro do obturador e vazão de ar. Levando-se em conta os aspectos citados, optou-se pela manutenção do tipo de **END** adotado na linha de pesquisa com o emprego de **Técnicas Ultra-sônicas (TUS)** não invasivas, que se configurou devido aos argumentos expostos, como o mais adequado ao modelo de processo adotado.

A seqüência da investigação para definição do tema da pesquisa deveria a partir desta filosofia adotada propor uma nova abordagem da análise do sinal de eco de fundo, com a aplicação de uma ferramenta matemática que tivesse desempenho compatível à **TF** e que ainda permitisse a extração de interferências inerentes ao processo em questão. A evolução natural da **TF**, ao longo dos tempos, criou diversas vertentes na análise e processamento de sinais, tendo o surgimento de novas propostas de leis e teoremas matemáticos, que a partir de uma escolha conveniente, pudesse viabilizar a filtragem de sinais indesejáveis (ruídos), além da manutenção das características essenciais do sinal original.

O aprofundamento da pesquisa mostrou que no processo construtivo de aprimoramento da técnica de processamento de sinais, a **Transformada Wavelet (TW)** surge como uma etapa evolutiva da **TF**, de grande importância, pois proporciona aquisição de informações locais e temporais na análise de sinais obtidos nas simulações de diversos processos.

A metodologia utilizada para o funcionamento do protótipo teve como principal diferencial a preocupação em procurar um caminho alternativo para a pesquisa, de modo que pudesse retratar, da forma mais fiel possível, o papel do escoamento das bolhas geradas no comportamento do sinal de eco de fundo referente ao ultra-som. Para tal, foi gerado um sinal de eco de fundo sem influência de bolhas, de modo a proporcionar comparação futura com os demais sinais com bolhas obtidos, permanecendo apenas as influências das interferências relativas aos ruídos gerados no próprio processo no percurso do sinal de ultra-som.

Na execução dos ensaios do protótipo, após aquisição dos sinais denominados com e sem bolhas na análise do sinal de eco de fundo, a Interface Gráfica de Análise de **TW** constante da biblioteca de aplicativos do software Matlab, foi utilizada no processamento dos sinais pela **Análise Discreta Wavelet (ADW)**, que permitiu a visualização das diversas formas de onda, na decomposição em vários níveis de frequência, do sinal identificado para cada situação do experimento.

A análise discreta dos sinais contínuos no tempo propiciou a filtragem dos sinais espúrios, incorporados aos sinais das bolhas, utilizando-se o processo de filtragem com o emprego de famílias wavelets escolhidas e identificadas com seus respectivos comprimentos de suporte, que são caracterizados pela identificação numérica utilizada logo após o termo da família wavelet, além do nível de filtragem do sinal.

A exploração dos valores obtidos na simulação possibilitou escolher dentre as diversas famílias de wavelets aquelas que melhor configurassem as formas de onda, com a exclusão das interferências ocorridas no processo de caracterização de uma condição de escoamento, além da plotagem do espectro de energia da parcela de interferências provocadas pelas bolhas. Deste modo, a caracterização do escoamento é definida pela quantificação do nível de perturbações provocadas no sinal, de acordo com a associação à quantidade de bolhas, área da superfície das bolhas e número de bolhas por unidade de volume na coluna de líquido.

A Interface Gráfica utilizada permitiu a obtenção das curvas dos espectros de energia dos sinais residuais, resultantes do processo de filtragem dos sinais de aquisição de eco de fundo, com baterias de filtros de frequência passa-baixa e passa-alta. A partir daí, a identificação dos valores máximos das amplitudes dos espectros de energia dos resíduos, em função da variação da vazão e diâmetro, permitiu a construção de tabelas e gráficos para obtenção de argumentos necessários à análise da pesquisa.

As tabelas e gráficos construídos a partir destes valores tornaram possível a visualização e análise do comportamento dos escoamentos simulados, além da demonstração de caracterização final do processo objeto de estudo. O uso de comparações com outras técnicas utilizadas na linha de pesquisa do **CEFET-RJ** foi utilizado como forma de validação do caminho alternativo escolhido na análise dos sinais obtidos nas simulações.

CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

I.1 - HISTÓRICO

A dinâmica da análise de sinais consiste na busca de elementos característicos contidos nas formas de onda representativas da ocorrência dos processos ou sistemas dinâmicos, ou seja, representação de modelos matemáticos, que permitam definir comportamentos característicos dos processos avaliados. Para a extração destas informações utilizam-se ferramentas matemáticas para processamento dos sinais, e desta forma, estabelece-se uma amostragem do perfil dos mesmos em relação ao tempo.

O marco inicial na história para a evolução da análise de sinal deve-se a Joseph Fourier, que em 1807 construiu uma ferramenta com base na superposição de senos e cosenos, proporcionando a plotagem de um sinal em amplitude versus freqüência, conforme mostrado na figura I.1, pela transformação da tradicional representação de amplitude versus tempo, dando origem à **TF** e iniciando-se a partir daí, novas pesquisas e tendências para obtenção de novas transformadas, constituindo-se como base teórica para os diversos tipos de análise de sinais ao longo do tempo. [3].



Figura I.1 - Processamento de sinal por TF [3].

O gráfico que expressa a representação do sinal, após a aplicação da **TF**, através de um espectro correlacionando a amplitude deste sinal e o valor de freqüência, não apresentando, entretanto, as informações de ocorrência temporal, pode ser visto na figura I.2.

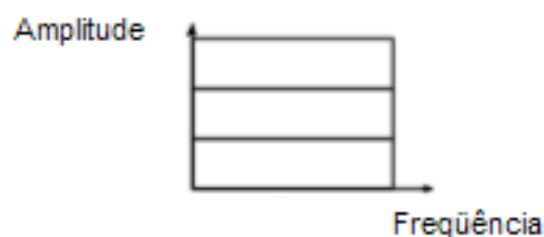


Figura I.2 - Representação de sinal por TF [3].

As pesquisas de Joseph Fourier repercutiram de tal forma na comunidade acadêmica, que proporcionou, ao longo do tempo, o interesse de diversos matemáticos no esforço de alterar o conceito de análise de freqüência para o de análise de escala. Estas pesquisas contribuíram para a geração dos conceitos fundamentais para o surgimento da wavelet, uma ferramenta matemática que, através do janelamento do sinal, permite a transformação de um sinal no tempo em ondas com informações de escalas e posições, conforme está mostrado na figura I.3. [4].

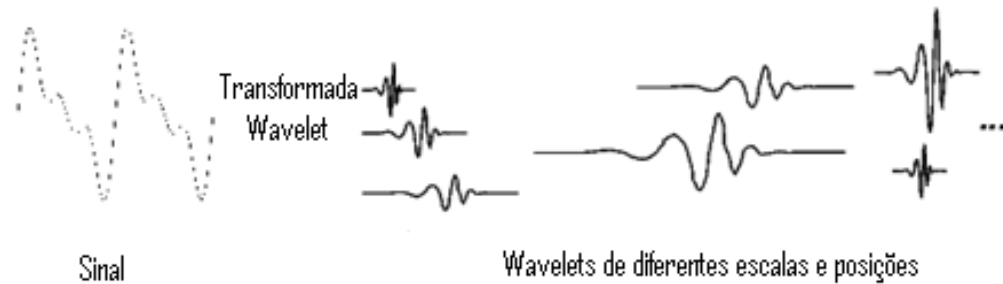


Figura I.3 - Representação de escalas e posições [4].

A utilização, pela primeira vez, do termo wavelet, ondelete ou pequena onda, credita-se a Alfred Haar, que num apêndice incorporado à sua tese sugeriu este novo conceito de pequena amostragem de sinal, conforme mostrado na figura I.4, para a execução da análise de sinais, que pudessem ser menos influenciáveis aos ruídos ou amostragem dos sinais incorporados ao sinal principal, através do emprego das divisões em escalas. [5].

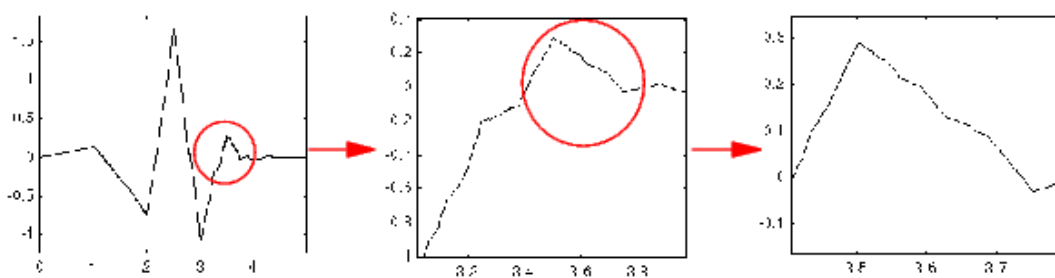


Figura I.4 - Amostragem de sinal por janelas [5].

A wavelet de Haar é considerada a mais simples, mas nem por isso deixa de ter sua importância reconhecida como a primeira wavelet, a wavelet mãe. Enquadrada na classe da base ortogonal, esta wavelet é descontínua e não diferenciável. O gráfico que representa a plotagem da wavelet de Haar encontra-se ilustrado na figura I.5.

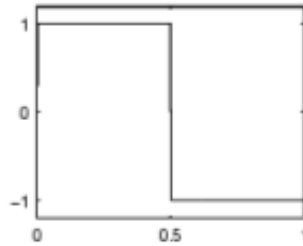


Figura I.5 - Representação da wavelet de Haar [5].

O trabalho de Shannon merece também uma referência, pois permitiu a análise dos sinais a partir de uma transformada com preservação das informações no tempo, mas com perda de informação de frequência, obtendo a plotagem de um sinal em amplitude versus tempo. O gráfico que expressa a plotagem de um sinal a partir da correlação entre amplitude de sinal e o tempo encontra-se representado na figura I.6. [6].

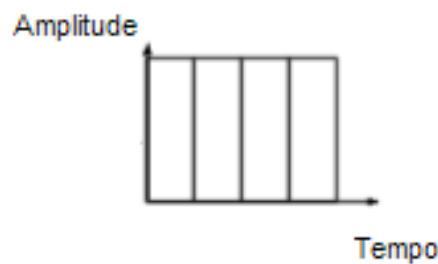


Figura I.6 - Representação de sinal por Shannon [6].

Entre os anos de 1930 e 1940 os estudos intensificaram-se na pesquisa para representação de funções com variações de escalas, que é a essência básica da teoria das wavelets, e dentre estes trabalhos ressalta-se a do pesquisador Paul Levy, que utilizou a wavelet de Haar para análise de um sinal aleatório, em seu estudo de investigação do movimento browniano. [7].

Outro passo decisivo para a evolução da transformada wavelet deve-se a Dennis Gabor, que em 1946 ao realizar um trabalho de pesquisa, visando à preservação de informações contidas num determinado sinal variável no domínio do tempo e ao utilizar a **TF** descobriu que para não perder estas informações, precisaria introduzir modificações para a análise de pequenas parcelas do sinal. O gráfico que expressa a correlação entre valor de frequência e tempo, para um dado sinal, pode ser visto na figura I.7. [8].

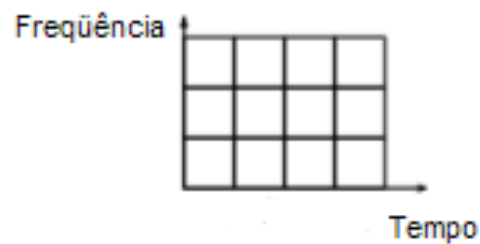


Figura I.7 - Representação de sinal por Gabor [8].

A partir desta situação surge, então, o janelamento das funções, dando origem à **Transformada de Fourier de Tempo Curto** ou **Curta Duração** ou **Short Time Fourier Transform (STFT)**, também conhecida como, **Transformada Wavelet Janelada** ou **Transformada de Gabor**, cujo modelo de representação é apresentado na figura I.8.

No transcurso do trabalho, mais especificamente no item I.3.2, é mostrada uma representação desta transformada como etapa de transição para a obtenção da **TW**, com a respectiva equação de análise de tempo-freqüência, com o intuito de estabelecer uma cronologia e seqüência do processo evolutivo dos conceitos e regras matemáticas aplicáveis.

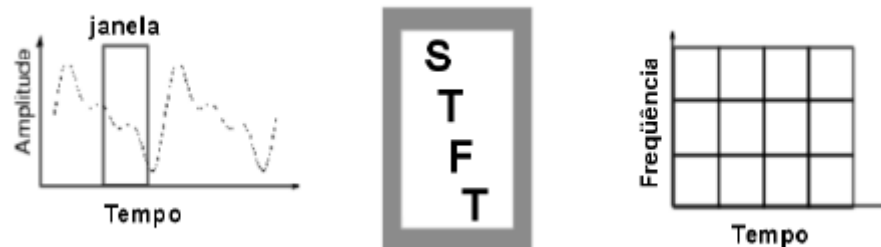


Figura I.8 - Representação de sinal por STFT [8].

Em 1980, surgiram os primeiros conceitos de forma teórica propostos por Jean Morlet e sua equipe do Centro de Física Teórica de Marselha, na França, cujo trabalho foi orientado por Alex Grossmann e que obtiveram êxito com a representação do sinal através de escala versus tempo, de acordo com a figura I.9. [9].

Na mesma época, Yves Meyer e equipe conseguiram construir a primeira wavelet não trivial, ou seja, com aspectos mais complexos, que asseguraram a sua rápida disseminação nos anos seguintes, abrindo novos caminhos de pesquisa para obtenção de novas famílias de wavelets. [10].

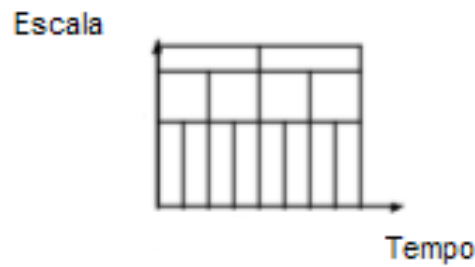


Figura I.9 - Representação de sinal por escala [9].

Entre os anos de 1980 e 1990 surgiram diversos trabalhos de pesquisa executados por cientistas envolvidos no desenvolvimento das wavelets, dentre os quais podem ser citados, Ingrid Daubechies, Stephane Mallat, Ronald Coifman e Victor Wickerhauser, que estabeleceram as diversas bases de suporte para utilização desta ferramenta matemática, cuja representação está mostrada na figura I.10. [11,12,13,14].



Figura I.10 - Representação de sinal por Wavelet [3].

Um modelo de algoritmo mais recente, que é empregado na análise discreta de sinal por **TW**, encontra-se representado na figura I.11, com o intuito de proporcionar um entendimento mais claro sobre a finalidade da análise de sinal, a partir do uso desta ferramenta. A análise contínua tem por característica a identificação de particularidades do sinal, através da obtenção de valores de coeficientes de escala na varredura da forma de onda.

O sinal obtido pela medição no processo é desmembrado, através de uma seqüência de aberturas de janelas, obtendo-se parcelas do sinal denominadas aproximações e detalhes. As aproximações referem-se às parcelas de baixa freqüência do sinal oriundo da aplicação de filtragem passa-baixo e os detalhes referem-se às parcelas de alta freqüência do sinal oriundo da aplicação da filtragem passa-alto.

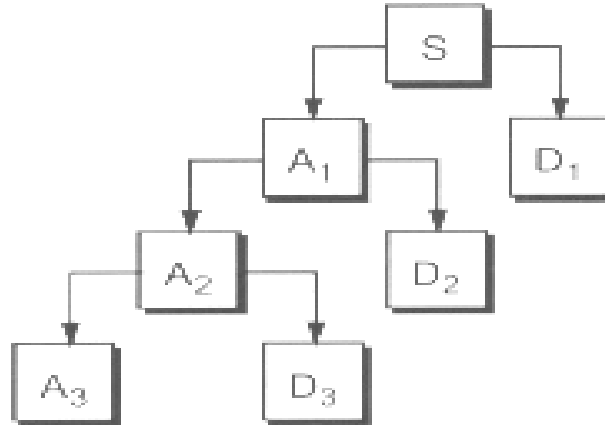


Figura I.11 - Algoritmo de decomposição de sinal por Wavelet [15].

As aproximações são decompostas, sucessivamente, conforme pode ser visto na figura I.12, fazendo surgir novas aproximações e novos detalhes, num processo cíclico, em número de níveis tais, que possam definir um valor final de aproximação mais próximo quanto possível do sinal original, valor este obtido pelos janelamentos aplicados na função representativa do sinal considerado fundamental. [15].

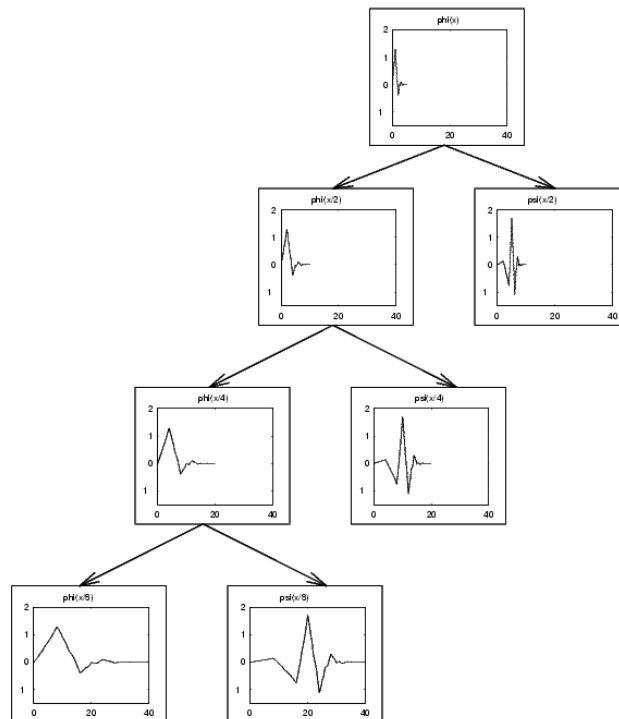


Figura I.12 - Algoritmo de análise de sinal por Wavelet [15].

As aproximações são definidas como espelhos do sinal original, ou como a onda fundamental, sendo a tendência natural obter-se uma aproximação tanto mais próxima do sinal, quanto maior for o nível de decomposição do sinal e extração dos detalhes.

Os detalhes são definidos como parcelas de sinal agregados ao sinal original, originários de diversas causas, e que na filtragem são preferencialmente retirados da onda fundamental. Em termos gerais, estes detalhes são mais comumente chamados de resíduos.

O funcionamento do algoritmo define as aproximações e detalhes, de acordo com a quantidade de níveis de decomposição empregados, permitindo também a reconstrução do sinal original, através do emprego de um algoritmo inverso, que consiste na recomposição das aproximações e detalhes, conforme visto na figura I.13.

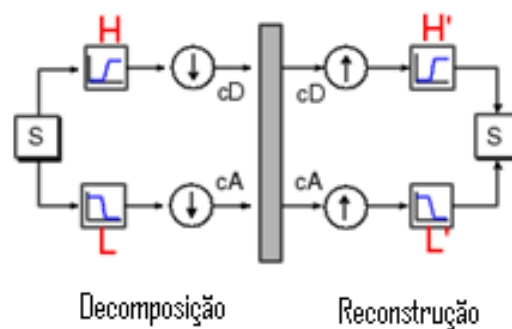


Figura I.13 - Algoritmo de decomposição / reconstrução de sinal [15].

Os coeficientes de detalhes, conforme mostrado na figura I.14, podem ser constituídos de parcelas de sinais espúrios oriundos de diversos tipos de interferências, ou até mesmo, por sinais produzidos pelo próprio processo que está sendo caracterizado, que podem agregar formas de ruídos à propagação do sinal original.

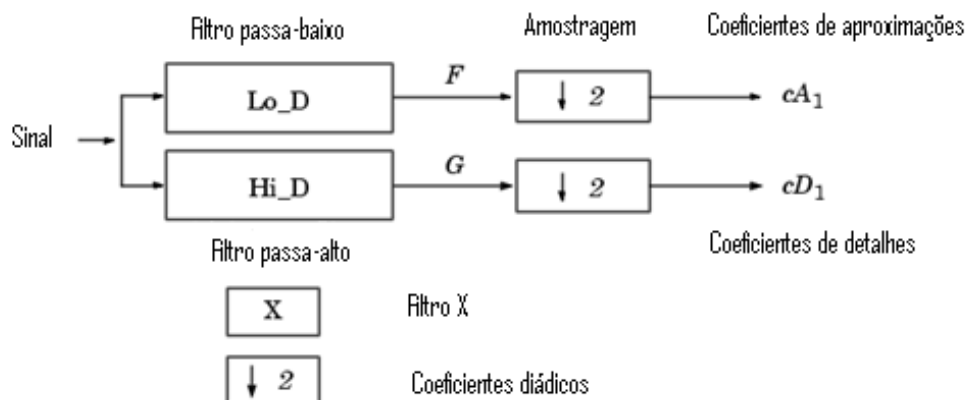


Figura I.14 - Algoritmo de decomposição de sinal [15].

I.2 - TRANSFORMADA DE FOURIER

A aplicação da **TF** destina-se à representação de densidade de energia espectral dos sinais de eco de fundo, que são plotados na forma de amplitude de tensão versus frequência, consistindo da aplicação de uma expressão matemática definida num intervalo de integração considerado, apresentando um processo de convolução entre duas funções, sendo uma não periódica e outra na forma de senos e cossenos.

Esta representação, conforme mostrado na equação I.1, fornece resultado de alta qualidade do espectro de energia, que permite a caracterização do processo a partir do sinal processado.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (I.1)$$

Onde:

$F(\omega)$ → função de densidade espectral;

$f(t)$ → função qualquer não periódica;

$e^{-j\omega t} = \cos(\omega t) - j \sin(\omega t)$

$-\infty < t < +\infty$ → intervalo de integração das exponenciais

$-\infty < \omega < +\infty$ → intervalo das frequências

A **TF** foi construída com base na teoria referente aos espaços e subespaços e suas projeções, como rápida referência aos mecanismos e objetivos da simulação, mas cumpre-se, entretanto, a tarefa de citar alguns teoremas e princípios matemáticos importantes, com o intuito de fornecer informação complementar necessária.

Como o assunto principal tem uma relação direta com as bases matemáticas de geração das transformadas, segue abaixo, alguns teoremas importantes no contexto da teoria da **TF**, responsáveis diretos no processo evolutivo na análise e processamento de sinais:

- **Teorema de Parseval**

O teorema refere-se à equiparação das energias no domínio espacial e no domínio de Fourier, através da integração do quadrado da função equivalente ao sinal sobre todo o domínio da função, conforme mostrado na equação I.2. [16].

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |f(x, y)|^2 dx dy = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(w_x, w_y)|^2 dw_x dw_y \quad (1.2)$$

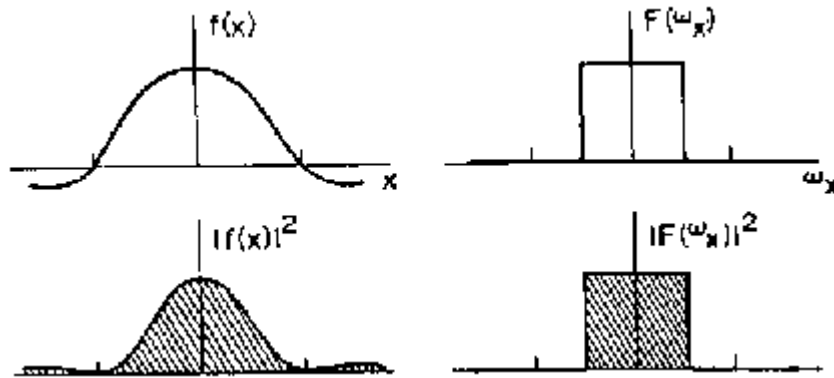


Figura 1.15 - Equiparação de energias de sinais.[16]

A forma mais clara a equiparação das áreas sob as curvas é representada pela equação 1.3, além das próprias curvas mostradas na figura 1.15.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(x)|^2 dx = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} |F(w_x)|^2 dw_x \right] \quad (1.3)$$

- **Amostragem de Shannon-Nyquist**

O teorema mostra que para qualquer sinal, a frequência de amostragem deve ser igual ou superior ao dobro da frequência máxima contida no sinal, sob pena de perda de informações importantes contidas neste mesmo sinal, conforme pode ser observado na equação 1.4. [17].

Seja um sinal,

$$x(t) = a \cos(2\pi ft) \quad (1.4)$$

$a \rightarrow$ amplitude;

$f \rightarrow$ frequência = $\frac{1}{T}$;

$T \rightarrow$ período;

$$x_n = a \cos(2\pi n f T) \quad (1.5)$$

Para a manutenção de um sinal com nova frequência, tem-se

$$f = \frac{1}{T} - f_o \quad (1.6)$$

Tem-se,

$$y(t) = b \cos\left(2\pi\left(\frac{1}{T} - f\right)t\right) \quad (1.7)$$

Para uma saída amostrada à mesma frequência, tem-se

$$y_n = b \cos\left(2\pi n\left(\frac{1}{T} - f\right)T\right) = b \cos(2\pi n(1 - fT)) \quad (1.8)$$

$$y_n = b \cos(2\pi n f T) \quad (1.9)$$

Considerando a frequência mais alta como f_H , tem-se

$$\frac{1}{T} > 2f_H \quad (1.10)$$

Se o inverso do período de amostragem for maior que o dobro da frequência f_H , tem-se

$$\frac{1}{T} \rightarrow \text{frequência de Nyquist}$$

Fórmula de Shannon:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(nT) \frac{\sin\left(\frac{\pi}{T}(t - nT)\right)}{\frac{\pi}{T}(t - nT)} \quad (1.11)$$

- **Teorema de Paley-Wiener**

O teorema abaixo trata das funções contínuas e integráveis num plano complexo. [18].

Seja a função $f(z)$, tal que

$$|f(z)| \leq Ke^{\gamma|z|} \quad (1.12)$$

Para $K \geq 0$ e $\gamma > 0$, quando f tem uma restrição em $L^2(\mathfrak{R})$,

A função $g(t) \in L^2(-\gamma, \gamma)$ assume o valor

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\gamma}^{\gamma} g(t)e^{izt} dt \quad (1.13)$$

- **Inequação de Cauchy-Schwartz**

A inequação aplica-se na convexão da parábola, ou seja, na equação 1.14,

$$d(y = x^2) = 2$$

Com valor positivo para qualquer x , conforme estabelecido em WIKIPEDIA [19].

Se a_1, \dots, a_n e b_1, \dots, b_n são números reais diferentes de zero,

Então

$$\sum_{i=1}^n a_i b_i \leq \left(\sum_{i=1}^n a_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^n b_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.14)$$

Se

$$a_i = cb_i \quad \forall i = 1, \dots, n \quad c = cte$$

Se a e b são reais, então $(a-b)^2 \geq 0$, sendo $a \neq 0$ e $b \neq 0$, temos

$$ab \leq \frac{a^2 + b^2}{2}, \quad (1.15)$$

Considerando ainda a equação (1.14), tem-se

$$A = \left(\sum_{i=1}^n a_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{e} \quad B = \left(\sum_{i=1}^n b_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

O que resulta na equação 1.16,

$$\sum_{i=1}^n a_i b_i = AB \left(\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{A} \cdot \frac{b_i}{B} \right) \quad (1.16)$$

Aplicando n vezes na equação 1.16, para cada i , tem-se

$$\frac{a_i}{A} \cdot \frac{b_i}{B} \leq \frac{\frac{a_i^2}{A^2} + \frac{b_i^2}{B^2}}{2} \quad (1.17)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i b_i \leq AB \frac{\frac{\sum_{i=1}^n a_i^2}{A^2} + \frac{\sum_{i=1}^n b_i^2}{B^2}}{2} = AB \quad (1.18)$$

I.3 - TRANSFORMADA DE FOURIER x TRANSFORMADA WAVELET

O tema central do trabalho gira em torno da escolha da **TW** como alternativa para a caracterização da presença de bolhas num dado escoamento ensaiado, em substituição à **TF**, tradicionalmente utilizada para análise de sinais. A sustentação teórica para a quebra deste paradigma pode ser sintetizada através da comparação de algumas características básicas destas duas importantes ferramentas matemáticas.

A abordagem é objetiva para proporcionar a identificação dos principais conceitos, que justifiquem a escolha e focados na orientação do processamento do sinal e na determinação da característica do escoamento. [20].

I.3.1 - Características da Transformada de Fourier

A **TF** mantém sua importância e continuará a ser utilizada na análise de sinais, cujo comportamento dinâmico se enquadre no perfil mais adequado. A não utilização desta ferramenta segue justamente esta filosofia, ou seja, a partir de suas características principais abaixo, procurou-se identificar dentre as mesmas as condições de contra-indicação para sua utilização.

- A base de cálculo apóia-se no somatório de funções de senos e cosenos e respectivos coeficientes;
- A análise é executada a partir de uma visão global do comportamento do sinal em questão;
- Análise é concentrada nos sinais localizados em função dos valores dos cosenos;
- Apresenta um desempenho muito pobre para análise de sinais do tipo randômico, aleatório, não periódico ou não estacionário;
- Análise do comportamento do sinal concentra-se na amostragem do espectro de freqüência;
- Apresenta alta sensibilidade a ruídos, o que mascara a verdadeira grandeza do sinal original.

A apresentação das características da **TF** repercute positivamente na escolha do estudo da **TW** e reforça ainda mais a importância do trabalho, pela sua intenção de mostrar um novo caminho para **END**, aplicáveis na área de engenharia de materiais, mas não desmerece de forma alguma a continuidade dos estudos de processamento de sinais, ao se utilizar a **TF**, esta centenária ferramenta matemática, que continua contribuindo e muito para o desenvolvimento científico, o que denota a inestimada importância de sua invenção. [21].

I.3.2 - Transformada de Gabor

A **TW** originou-se a partir de uma variante da **TF**, a Transformada de Gabor ou **TF** janelada, mostrada na figura I.16, que é uma transição entre **TF** e **TW**. Assim sendo, existem pontos comuns em termos de base teórica, com a geração de sub-bases de um universo comum, de acordo com a equação I.19.

$$U(b,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t-b)u(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (I.19)$$

Onde:

$U(b,f)$ → Transformada de Fourier com uma Janela;

$g(t)$ → função gaussiana;

Parâmetros:

b, f → Análise de tempo e frequência;

b → Tempo;

f → Frequência;

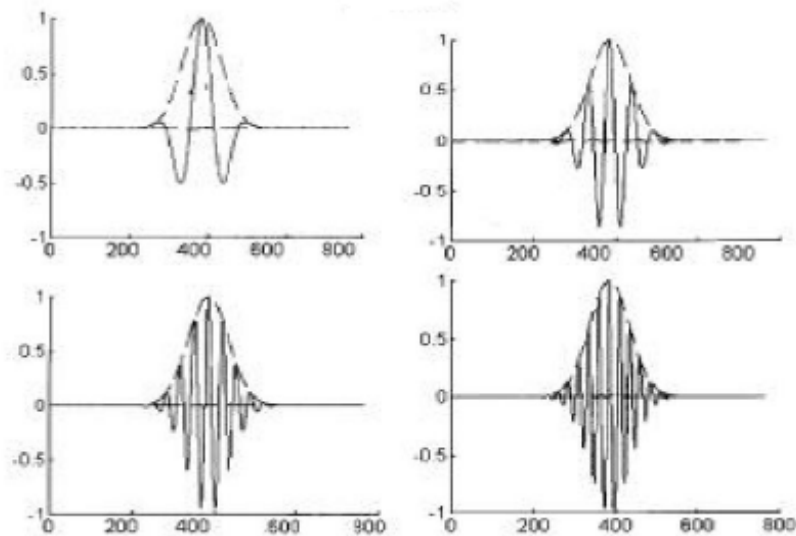


Figura I.16 - Funções básicas da Transformada de Gabor [21].

I.4 - TRANSFORMADA WAVELET

A **TW** vem progressivamente aumentando sua importância na análise de sinais e imagens, cujas características particulares mostradas abaixo, comprovam seu desempenho em processamento de sinais similares à situação proposta.

- A base de cálculo apóia-se no somatório de um conjunto infinito de funções base;
- A análise é executada a partir de uma visão local do comportamento do sinal em questão;
- Análise é concentrada nos sinais com pulsos breves;
- Apresenta um desempenho ótimo para análise de sinais do tipo randômico, aleatório, não periódico ou não estacionário;

- Análise do comportamento do sinal concentra-se na amostragem dos valores das escalas;
- Apresenta baixa sensibilidade a ruídos, o que propicia a obtenção da verdadeira grandeza do sinal original.

I.4.1 - Conceitos gerais

A **TW** configura-se como uma ferramenta poderosa na análise de sinais, pois se enquadra numa série de aplicações científicas, além do contexto tecnológico atual, não restando dúvidas de que seu aprimoramento possibilitará novas conquistas, aplicações e usos, a partir do emprego de novos aplicativos, interfaces gráficas, algoritmos, criando deste modo, uma massa crítica responsável pela expansão do conhecimento e suscitando novas expectativas na análise e simulações de processos e equipamentos.

I.4.1.1 - Aplicações

Atualmente esta transformada é aplicada em vários campos da ciência e tecnologia, num processo evolutivo que certamente definirá novos conceitos, aplicações e, bem provavelmente, o surgimento de outras transformadas. [22].

- Análise do espectro de sinais;
- Análise de imagens;
- Filtragem de sinais e imagens;
- Identificação de descontinuidades;
- Caracterização de escoamentos bifásicos;
- Análise de sinais biomédicos;
- Identificação de padrão de tons musicais;
- Análise de parâmetros de economia;
- Resolução de equações diferenciais parciais no campo da matemática pura aplicada;
- Descontaminação de sinais medidos, com a supressão de ruídos (Denoising);
- Caracterização de processos químicos;
- Identificação de trincas em processos de soldagem;
- Ensaios não destrutivos em equipamentos industriais.

I.4.1.2 - Espaços vetoriais

Os espaços vetoriais, citados abaixo, constituem-se como o suporte matemático para a formulação da teoria geral da **TW**, como já foi mencionado anteriormente, sendo caracterizados como subespaços projetados nos espaços vetoriais definidos por outras transformadas, seqüências e teoremas. A apresentação dos conceitos básicos está apoiada no conhecimento global das bases matemáticas, onde incluem-se os vários tipos de aplicações, que em consequência, permeiam os princípios de análise e processamento de sinais. Os principais estudos que contribuíram para a criação da **TW** estão listados abaixo:

- **Espaço de Hilbert**

Espaço vetorial real finito de generalização do espaço Euclidiano, no qual está contido um produto interno. [23]:

$$\|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle} \quad (1.20)$$

O espaço de Hilbert é um caso particular do espaço de Banach, no qual a forma canônica é definida pelo produto interno.

- **Espaço de Banach**

Espaço vetorial normado e completo. [23].

$$\|f\| = \sup |f(x)| \quad (1.21)$$

Onde,

$$x \in [0, 1]$$

- **Bases de Schauder**

Uma base de Schauder pertence a um espaço de Banach onde uma sucessão de n elementos de um conjunto X , pode ser expresso por um somatório. [23].

$$x = \sum_1^{\infty} a_n x_n \quad (1.22)$$

Onde,

$$a_n \in \mathfrak{R}$$

- **Seqüência de Cauchy**

É uma seqüência de termos a_n quando naturais e sendo m e n suficientemente grandes, os termos a_m e a_n tornam-se arbitrariamente próximos, ou seja, se $\varepsilon > 0$, pode-se conseguir $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que $m, n > n_0$, conforme estabelecido em MATHFIRE[24], e implicando em,

$$|a_m - a_n| < \varepsilon \quad (1.23)$$

Sintetizando temos,

$$\forall \varepsilon > 0, \exists n_0 \in \mathfrak{N}, \forall m, n > n_0, |a_m - a_n| < \varepsilon$$

- **Medida de Lebesgue**

É uma medida estatística que representa a probabilidade da freqüência de ocorrência de uma variável numa determinada seqüência de eventos. [23].

Sendo,

$\lambda \rightarrow$ medida de Lebesgue

$A \rightarrow$ conjunto da medida de Lebesgue em \mathfrak{R}

Tal que $\lambda(A) \leq +\infty$

$$\int_R |x_A - x_G| d\lambda = |\lambda(A) - \lambda(G)| < \varepsilon \quad (1.24)$$

Então existe $G \rightarrow$ conjunto aberto

Se $\varepsilon > 0$

Então,

$$\int_R |x_A - f| d\lambda < \varepsilon \quad (1.25)$$

- **Teorema de Carleson**

É um teorema relacionado à convergência da Série de Fourier, com base nos espaços vetoriais de Banach e Hilbert. [25].

$$\|x\|^2 = \left\langle \sum_{j=1}^n c_j x_j, \sum_{k=1}^n c_k x_k \right\rangle = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n c_j \bar{c}_k \langle x_j, x_k \rangle = \sum_{j=1}^n |c_j|^2 \quad (1.26)$$

$$\langle x, x_j \rangle = \left\langle \sum_{k=1}^n c_k x_k, x_j \right\rangle = \sum_{k=1}^n c_k \langle x_k, x_j \rangle = c_j \quad (1.27)$$

Seja μ a medida de Carleson em função de S,

$\mu \rightarrow$ medida não negativa de um disco D^p aberto num plano complexo.

Onde,

$$\mu(S) \leq C * h$$

$$S = \{ r e^{i\theta} \mid r \geq 1 - h, \theta_{\Pi} \leq \theta \leq \theta_{\Pi} + h \}$$

$$\|f\|_p = \lim_{v \rightarrow 1} \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-v}^v |f(re^{i\theta})|^p d\theta \right\}^{1/p} \quad (1.28)$$

Onde,

$$H^p, 1 < p < \infty,$$

Tem-se,

$$\int |f(z)|^p d\mu \leq C_p \|f\|_p^p \quad (1.29)$$

- **Medida de Haar**

Condições:

As funções contínuas de valor completo e de suporte compacto são consideradas integráveis, conforme representado pela equação I.30.

A medida de Haar μ é invariante para translações, onde o conjunto G é localmente compacto e comutativo. [26].

$$\int_G f(g) d\mu(g) = \int_G f(xg) d\mu(g), \quad (I.30)$$

$$x \in G,$$

$f \rightarrow$ funções μ - integráveis;

$\mu \rightarrow$ medida de Haar sobre G ;

μ - medível em $A \subseteq G \quad \forall x \in G$.

I.4.1.3 - Bases Wavelets

As bases wavelets são constituídas por famílias de wavelets e encontram-se divididas em duas classes: a base ortogonal e a base biortogonal. A correta escolha da wavelet permite a melhor análise do sinal, de acordo com o objetivo pré-estabelecido no escopo do trabalho de simulação. [27].

1.4.1.3.1 - Base ortogonal

A base ortogonal é caracterizada pela assimetria, compreendendo as famílias wavelets utilizadas para a decomposição do sinal sob investigação, mas sem a sua aplicação na reconstrução do mesmo sinal, ou seja, não existe reciprocidade na decomposição e recomposição do sinal objeto de estudo. A wavelet necessita então de outro tipo de wavelet para recomposição deste sinal.

As wavelets de base ortogonal têm a característica de representação do sinal com maior compactação, ou quando o processo que está sendo analisado exige a obtenção de informações relevantes em relação ao quantitativo, o que certamente contribui para uma análise mais eficiente.

1.4.1.3.2 - Base biortogonal

A base biortogonal é caracterizada pela simetria, compreendendo as famílias wavelets utilizadas, tanto para a decomposição do sinal sob investigação, quanto na aplicação de reconstrução de sinal pelo uso da Transformada Wavelet Inversa. Este tipo de wavelet mostra-se recíproca na reconstrução de sinal, após o sinal ser decomposto. [28].

1.4.2 - Análise Wavelet

A utilização da **TW** tem por objetivo analisar sinais não periódicos, extraído dos mesmos as informações temporais e locais, de acordo com a aplicação específica requerida, o que consiste na execução de somatório de janelamentos obtidos pela convolução da wavelet mãe com a função correspondente ao sinal a ser analisado, conforme representado na equação 1.31.

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi(a,b,t)dt \quad (1.31)$$

C → Coeficiente Wavelet;

ψ → Wavelet mãe;

a → Coeficiente de escala;

b → Coeficiente de posição;

t → Tempo.

A execução de aberturas de janelas tem por consequência a obtenção das wavelets filhas, em função das escalas, posições e os tempos definidos. Estes coeficientes, além do tempo, são os responsáveis pelo escalonamento e deslocamento da wavelet mãe. As wavelets filhas permitem a obtenção de informações específicas do sinal ou de resíduos incorporados aos mesmos.

$$\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \rightarrow \text{Wavelet filha} \quad (1.32)$$

1.4.2.1 - Coeficiente de escala

O coeficiente de escala tem por função executar a compressão ou dilatação do sinal a ser analisado. O procedimento a ser utilizado depende do tipo de análise a ser executada, para a aquisição de informações que sustentem as possíveis conclusões. A escolha adequada da escala e posição determina o tamanho da janela a ser utilizada para a análise do sinal, de

acordo com os objetivos da simulação. [29]. A principal diferença para a utilização da wavelet é a possibilidade do estudo de ocorrência de um evento com interesse na aquisição da informação procurada em função do tempo e no local de desempenho esperado.

As figuras I.17 a I.19 representam exemplos da utilização das escalas em alguns tipos de sinais. Outros tipos de sinais podem ser admitidos para expressar um dado escalonamento. O primeiro exemplo é mostrado na figura I.17, que trata de um sinal aleatório, não periódico, sendo analisado com a utilização da **TW**, através da aplicação de coeficientes de escala, tipos baixa e alta, produzindo compressão e alongamento do sinal, respectivamente.



Figura I.17 - Comparação de escalas em wavelet [29].

Um sinal senoidal é apresentado na figura I.18, sob a forma de uma função temporal e tendo a variação de sua forma de onda, em consequência da mudança do argumento da função, que funciona, deste modo, como uma forma de compressão do sinal original.

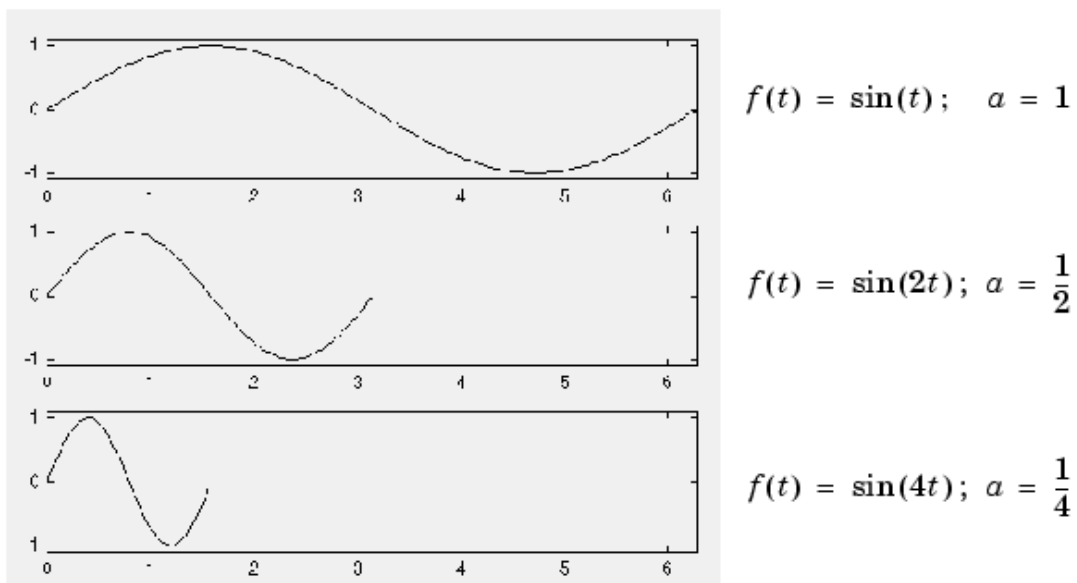


Figura I.18 - Exemplo de variação de sinal senoidal [29].

Um processo progressivo de compressão de uma dada wavelet mãe, a partir do emprego de coeficientes de escalas com valores fracionários, encontra-se representado na figura I.19. Pode-se observar claramente, que a diminuição da escala ocasiona a compressão da forma de onda do sinal e o aumento da escala, conseqüentemente, ocasiona de forma inversa o alongamento da forma de onda do sinal.

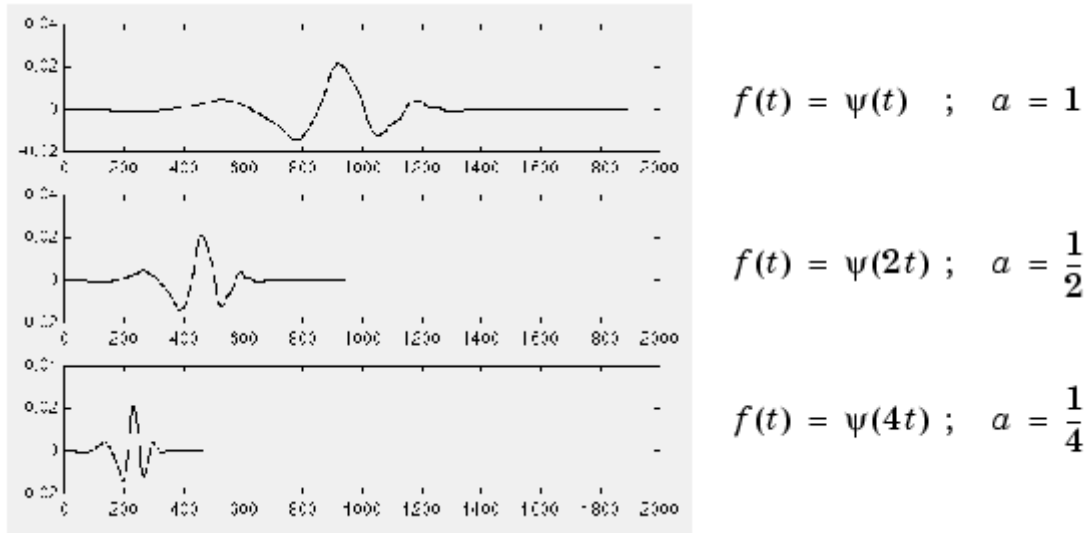


Figura I.19 - Exemplo de compressão de wavelet mãe [29].

I.4.2.2 - Coeficiente de posição

O coeficiente de posição tem por função executar o deslocamento do sinal a ser analisado, de acordo com a figura I.20, que apresenta duas situações: na primeira, o de uma wavelet mãe normal e na segunda, a mesma wavelet deslocada pela aplicação de um coeficiente de posição k , sendo o valor de k correspondente ao valor de b da equação I.32. O deslocamento é também conhecido por defasagem de um sinal em relação a sua origem, ou em relação a algum ponto específico pré-definido.



Figura I.20 - Exemplo de deslocamento da wavelet mãe [29].

I.4.2.3 - Coeficiente Wavelet

O coeficiente wavelet tem por função definir o tamanho da abertura da janela para a análise do sinal em determinado trecho ou local. As figuras I.21, I.22 e I.23 representam exemplos de aberturas de janelas de um sinal a partir do emprego de coeficientes wavelets com valores diferentes, que ocasiona também, em consequência, janelas de tamanhos diferentes.

A abertura de janela, aplicável a um determinado sinal, pode ser observada na figura I.21, onde a execução da análise se verifica, em função do coeficiente de escala de valor $C=0,0102$. Ao ser utilizado o mesmo valor de coeficiente wavelet, vê-se que a análise é executada no sinal com mesma abertura de janela, porém deslocando-se o sinal. Um exemplo desta análise de sinal pode ser vista na figura I.22, onde se verifica que foi mantida a abertura de janela idêntica à anterior, porém com localização da análise diferente devido à mudança do valor do coeficiente de deslocamento.

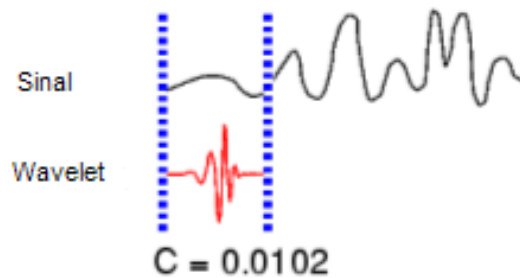


Figura I.21 - Abertura de janela de um sinal por wavelet [29].

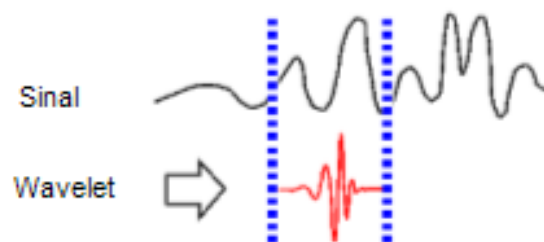


Figura I.22 - Deslocamento da janela com mesmo coeficiente [29].

Em contrapartida, nota-se uma diferença de análise em relação à figura I.23, pois empregando o mesmo sinal vê-se que a abertura da janela foi modificada, em função da utilização de coeficiente wavelet com valor $C=0,2247$, que é diferente do anterior.

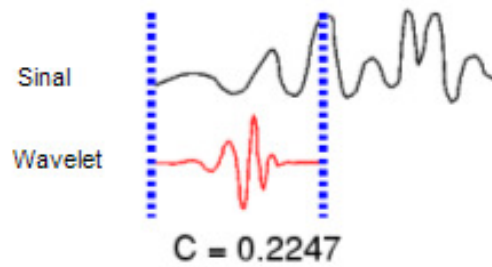


Figura I.23 - Abertura de janela com coeficiente diferente [29].

I.4.2.4 - Correlação de sinais

A correlação entre as formas de ondas do sinal a ser analisado e a wavelet a ser escolhida, tem particular importância no desempenho esperado da análise, onde a superposição das ondas e o alinhamento permitem obtenção de valores ótimos de aproximações e densidade espectral de energia, o que pode ser comprovado no trabalho em TEIXEIRA[30], que após a simulação constatou os melhores resultados obtidos com a wavelet com perfil de onda mais identificado com o sinal ensaiado. Baseado neste fato, a escolha da wavelet com forma de onda compatível com o tipo de sinal medido, propicia um considerável ganho de tempo pela execução da pré-análise do sinal.

As wavelets da família Daubechies Db2 e Db7 estão mostradas na figura I.24. A Db2 tem desempenho similar à wavelet de Haar, com período de amostragem de 1,5 e centro da frequência em 0,6667 e a Db7 com período de amostragem de 1,4444 e centro da frequência em 0,6423. Na mesma figura são apresentados exemplos destas wavelets superpostas aos sinais, correlacionando aproximação com o centro das frequências e o sinal. [31].

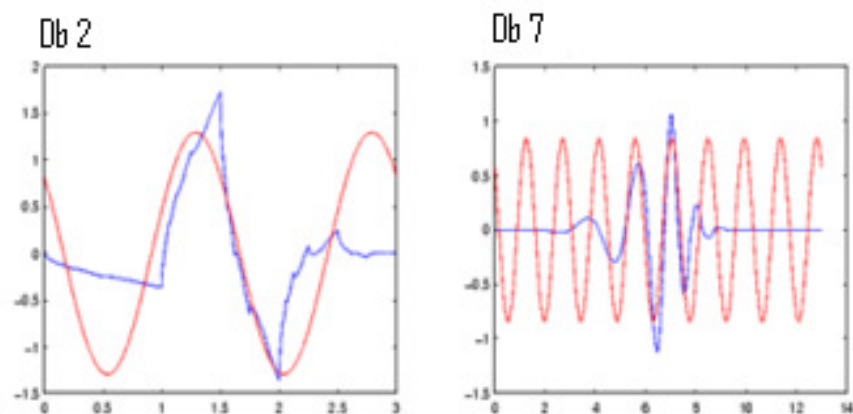


Figura I.24 - Wavelets Daubechies 2 e 7 [31].

Exemplos de wavelets da família Coiflet e Gauss encontram-se representados na figura I.25, a wavelet Coif 1 com período de amostragem de 1,25 e centro da freqüência em 0,50 e a wavelet Gaus 4 com período de amostragem de 2,0 e centro da freqüência em 0,50.

Pode-se observar nesta mesma figura, que a wavelet Gaus 4 apresenta uma correlação maior com a forma de onda do sinal apresentado, em relação à wavelet Coif 1, o que certamente contribuiria para obtenção de melhores resultados num processo de análise das características locais e temporais do sinal a ser analisado.

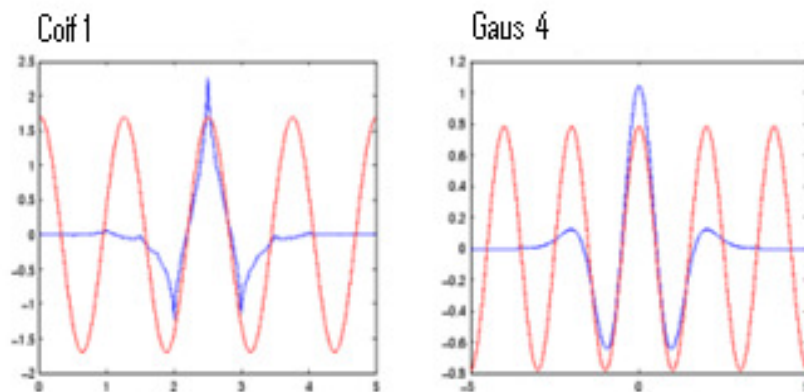


Figura I.25 - Wavelets Coiflet 1 e Gauss 4 [31].

As wavelets da família Gauss Complexa e Shannon encontram-se representadas na figura I.26, a wavelet Cgau 6 com período de amostragem de 1,6667 e centro da freqüência em 0,60 e a wavelet Shan 0.5-1 com período de amostragem de 1,2923 e centro da freqüência em 0,775. Na parte superior da figura encontra-se a componente real e na parte inferior tem-se a parcela imaginária.

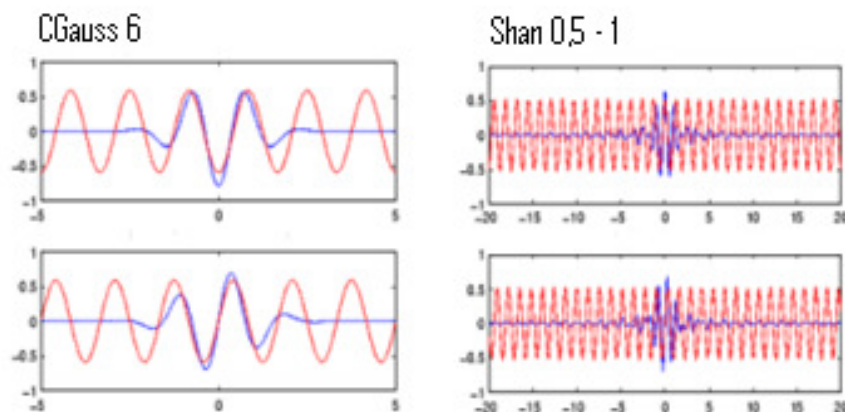


Figura I.26 - Wavelets Gauss Complexa 6 e Shannon 0,5 -1 [31].

I.4.3 - Famílias Wavelets

As wavelets são divididas em dois grupos, o primeiro grupo corresponde às wavelets uni-dimensionais, que são aplicadas na análise de sinais e o segundo grupo corresponde às wavelets bi-dimensionais, que são aplicadas na análise de imagens. Para cada grupo utiliza-se uma análise característica, através de algoritmos específicos para cada tipo de aplicação, tanto para wavelets contínuas quanto para wavelets discretas.[32].

Uma comparação entre as análises contínuas e discretas é apresentada na tabela I.1, tendo-se a representação de uma fórmula geral empregada para o cálculo dos coeficientes wavelets. Na análise contínua, os coeficientes de escala e posição pertencem ao universo dos números reais, sendo os coeficientes de escala com valores maiores que zero e os coeficientes de posição para qualquer valor real. Na análise discreta, os coeficientes de escala são potências de base 2 e os coeficientes de posição múltiplos de potências de base 2, denominadas diádicas. Os múltiplos e expoentes pertencem ao universo Z (Discretização / Amostragem).[33].

Tabela I.1 - Comparação entre Análise Contínua e Discreta [32].

ANÁLISE CONTÍNUA	ANÁLISE DISCRETA
$C(a, b) = \int_{\mathbb{R}} s(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$	$C(a, b) = \int_{\mathbb{R}} s(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$
$a \in \mathbb{R}^+ - \{0\}, b \in \mathbb{R}$	$a = 2^j, b = k2^j, (j, k) \in \mathbb{Z}^2$

I.4.3.1 - Wavelets discretas

As **Transformadas Wavelets Discretas (TWD)** são as transformadas correspondentes à execução de discretização das wavelets contínuas, sendo que esta discretização ocorre apenas nos parâmetros de escalas e deslocamentos e não nos parâmetros de tempo e espaço, o que define um reticulado no domínio dos parâmetros escala-deslocamento. A wavelet de Haar pode ser citada como a forma mais simples deste tipo de wavelet. A **TWD** está apoiada no escalonamento diádico, conforme mostrado na tabela I.1, que pode ser definido como a mudança das variáveis de escala e deslocamento do plano real para o plano de amostragem (plano Z). Um exemplo de algoritmo básico para decomposição do sinal pela análise discreta está representado na figura I.27.[34].

A wavelet discreta identifica os parâmetros correspondentes,

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \phi(t-k) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} d_{j,k} \phi(2^j t - k) \quad (1.33)$$

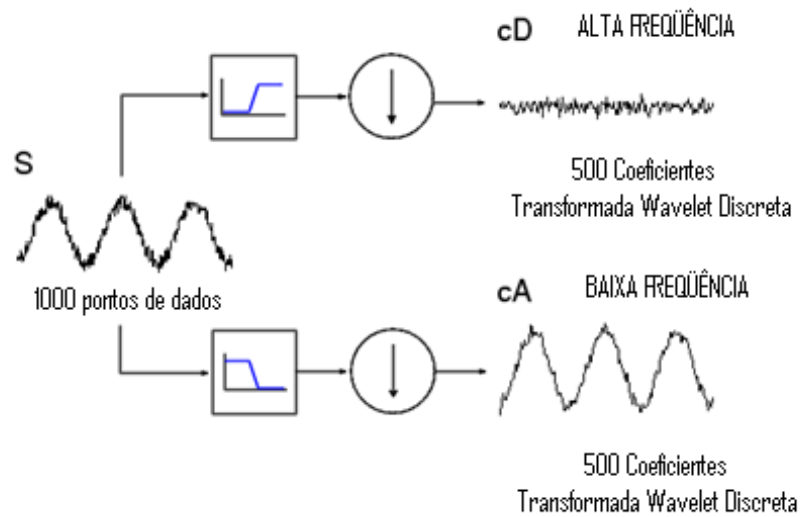


Figura 1.27 - Análise discreta de sinal [34].

Parâmetros c_k e $d_{j,k}$ sendo

$$k \in \mathbb{Z}, j \in \mathbb{Z}$$

As bases da wavelet discreta são as seqüências abaixo,

$$h = (h_n)_{n \in \mathbb{Z}} \quad \text{e} \quad h_n = \langle \phi_{0,0}, \phi_{1,n} \rangle$$

$$g = (g_n)_{n \in \mathbb{Z}} \quad \text{e} \quad g_n = \langle \phi_{0,0}, \phi_{1,n} \rangle$$

Resultando nas funções abaixo,

$\varphi(t) \rightarrow$ wavelet - mãe;

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_{n \in \mathbb{Z}} h_n \phi(2t - n) \quad (1.34)$$

$\phi(t) \rightarrow$ wavelet - pai;

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_{n \in \mathbb{Z}} g_n \phi(2t - n) \quad (1.35)$$

I.4.3.2 - Wavelets contínuas

As wavelets contínuas proporcionam a utilização de análise pela abertura de janelas de mesma dimensão ao longo da ocorrência do sinal, apresentando uma linearidade importante no estudo de determinado problema. O que garante a conclusão de análise e extração de informações de frequência num intervalo de tempo correspondente à posição no cálculo dos coeficientes wavelets. Esta é uma característica particular de localização tempo-frequência do sinal, que emprega a transformada adequada do sinal uni-dimensional, que acarreta, como consequência, a geração de uma matriz de coeficientes wavelets, de acordo com o estabelecido na figura I.28.

$$TWC(b, a) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1.36)$$

ψ → Wavelet;

a → Coeficiente de escala;

b → Coeficiente de posição;

t → Tempo;

$f(t)$ → função contínua no tempo.

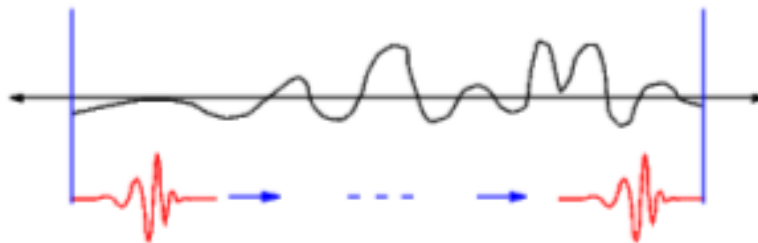


Figura I.28 - Análise contínua de sinal [29].

I.4.4 - Famílias Wavelets contínuas

As wavelets contínuas apresentam cruzamento na correlação entre um sinal variável no tempo, ou seja, uma função no tempo $f(t)$ e funções que são dilatadas ou comprimidas através de uma variável contínua conhecida como fator de escala, além da existência do fator de deslocamento. O processo de janelamento de função ocorre de forma contínua em todo o espectro do sinal ou função, permitindo a captação de características particulares do sinal, em razão da coexistência com a wavelet mãe definida. Incluídas em cada família wavelet existem sub-classes de wavelets, que diferem entre si pelo número de coeficientes e pelo nível de

iteração do algoritmo de análise. A diferenciação de wavelets dentro da própria família é denotada através do número de momentos vanishing, que tem correlação com o comprimento do suporte, cuja identificação põe-se logo após o nome da família wavelet. O número de momentos vanishing de uma wavelet (ψ) pode ser definido pela equação I.37.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} t^k \psi(t) dt = 0, \quad \text{se } 0 \leq k < p \quad (\text{I.37})$$

Algumas famílias de wavelets contínuas serão apresentadas nos itens a seguir, através de suas representações em respectivas figuras. Estas famílias são empregadas nos procedimentos de abertura de janelas de um determinado sinal, para execução da extração das características específicas a ser identificadas no mesmo.

I.4.4.1 - Wavelet de Daubechies

A análise para este tipo de wavelet é ortogonal, comprimento do suporte compacto da ordem de $2N-1$, número de momentos vanishing de ordem N e comprimento dos filtros de ordem $2N$. As funções são mais regulares e os pontos mais certos do que o encontrado em outros tipos. A wavelet Daubechies1 é equivalente a wavelet de Haar. A maioria destas wavelets não apresenta simetria, sendo que em alguns casos esta assimetria é muito evidente. A regularidade da wavelet é proporcional à ordem da mesma. Esta família possibilita a utilização de **TWC** e **TWD**, além da ortogonalidade e biortogonalidade, vide figura I.29.

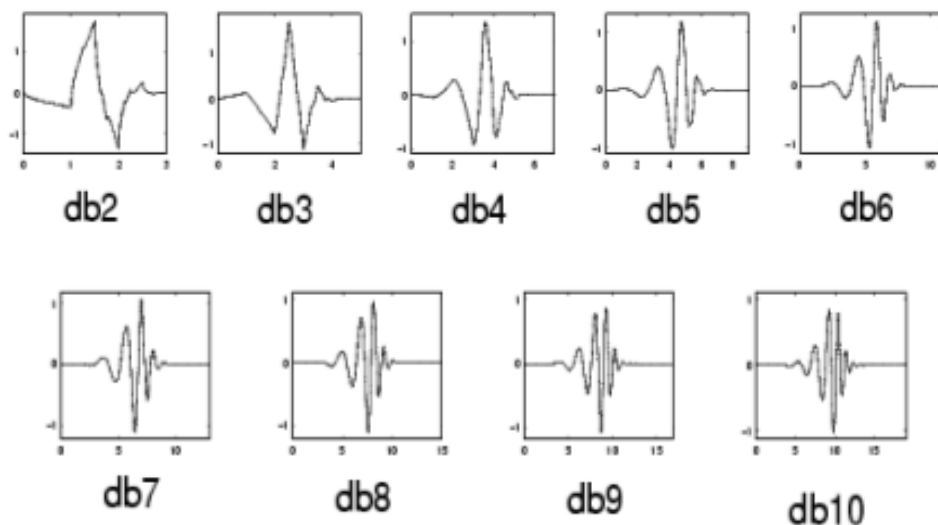


Figura I.29 - Família Daubechies [30].

I.4.4.2 - Wavelet Biortogonal

A análise para este tipo de wavelet é biortogonal, não atende à ortogonalidade, tendo comprimento do suporte compacto da ordem de $2N_R+1$ e $2N_D+1$, sendo R o índice de reconstrução e D o índice de decomposição e o número de momentos vanishing de ordem N_R . O comprimento dos filtros é $(2N_R, 2N_D)+2$. Esta família possibilita a utilização de **TWC** e **TWD**, além da característica de biortogonalidade e simetria. A wavelet mostra-se adequada na decomposição e reconstrução de sinais analisados, pois a aplicação compreende uma única utilização para o processamento de sinais, com a função de análise a partir da decomposição do sinal ensaiado em aproximações e detalhes, de acordo com o nível de decomposição e no procedimento inverso correspondente à síntese, efetuada após o devido tratamento dos mesmos, conforme figuras I.30 a I.43. [30].

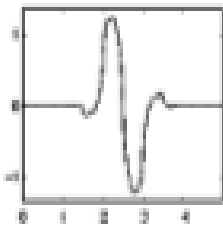


Figura I.30 - Biortogonal 1.3.

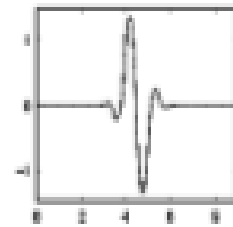


Figura I.31 - Biortogonal 1.5.

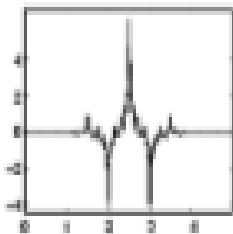


Figura I.32 - Biortogonal 2.2.

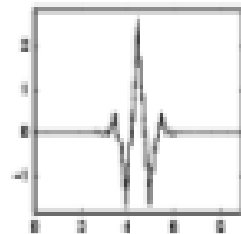


Figura I.33 - Biortogonal 2.4.

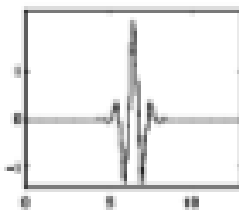


Figura I.34 - Biortogonal 2.6.

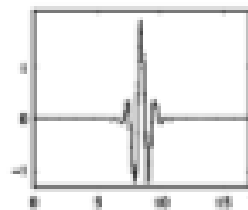


Figura I.35 - Biortogonal 2.8.

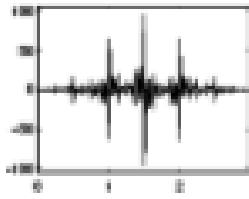


Figura I.36 - Biortogonal 3.1.

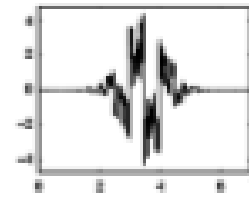


Figura I.37 - Biortogonal 3.3.

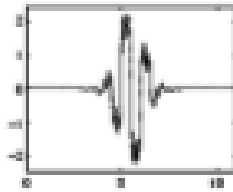


Figura I.38 - Biortogonal 3.5.

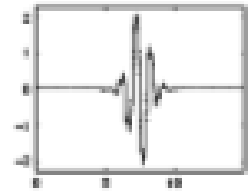


Figura I.39 - Biortogonal 3.7.

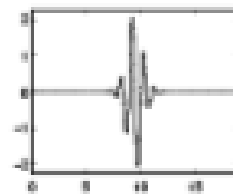


Figura I.40 - Biortogonal 3.9.

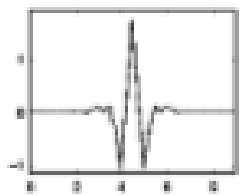


Figura I.41 - Biortogonal 4.4.

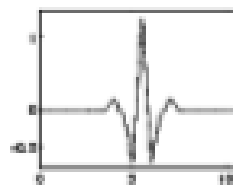


Figura I.42 - Biortogonal 5.5.

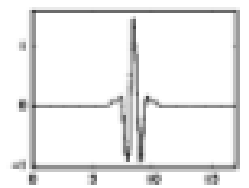


Figura I.43 - Biortogonal 6.8.

I.4.4.3 - Wavelet Biortogonal Reversa

A análise para este tipo de wavelet é biortogonal, não atende à ortogonalidade, tendo comprimento do suporte compacto da ordem de $2N_R+1$ para decomposição e $2N_D+1$ para reconstrução, sendo R o índice de reconstrução e D o índice de decomposição e o número de momentos vanishing de ordem N_D . O comprimento dos filtros é $(2N_R, 2N_D)+2$. Esta família possibilita a utilização de **TWC** e **TWD**, além da característica de biortogonalidade e simetria, conforme figuras I.44 a I.57. [30].

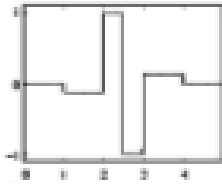


Figura I.44 - Biortogonal Reversa 1.3.

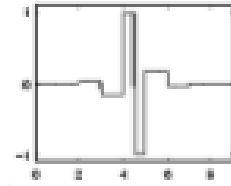


Figura I.45 - Biortogonal Reversa 1.5.

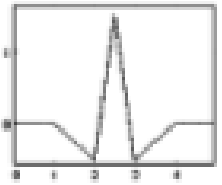


Figura I.46 - Biortogonal Reversa 2.2.

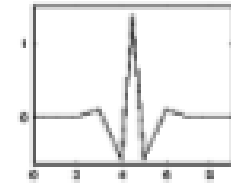


Figura I.47 - Biortogonal Reversa 2.4.

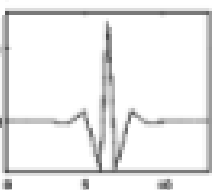


Figura I.48 - Biortogonal Reversa 2.6.

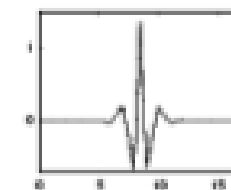


Figura I.49 - Biortogonal Reversa 2.8.

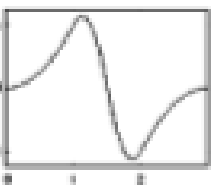


Figura I.50 - Biortogonal Reversa 3.1.

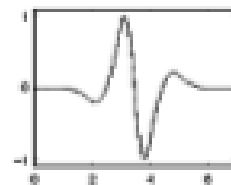


Figura I.51 - Biortogonal Reversa 3.3.



Figura I.52 - Biortogonal Reversa 3.5.

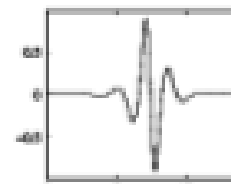


Figura I.53 - Biortogonal Reversa 3.7.

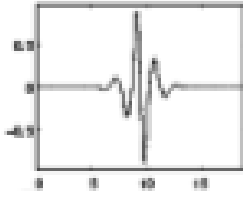


Figura I.54 - Biortogonal Reversa 3.9.

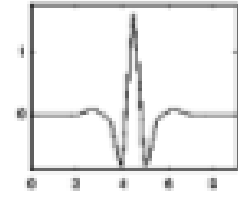


Figura I.55 - Biortogonal Reversa 4.4.

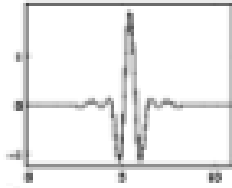


Figura I.56 - Biortogonal Reversa 5.5.

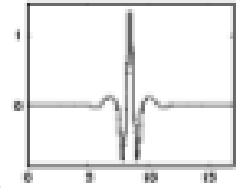


Figura I.57 - Biortogonal Reversa 6.8.

I.4.4.4 - Wavelet de Coifman (Coiflet)

A análise para este tipo de wavelet é ortogonal, que tem comprimento do suporte compacto da ordem de $6N-1$, sendo o número de momentos vanishing de ordem $2N-1$ e comprimento dos filtros de ordem $6N$. As funções apresentam simetria razoável e regularidade. Esta família possibilita a utilização de **TWC** e **TWD**, conforme figura I.58.

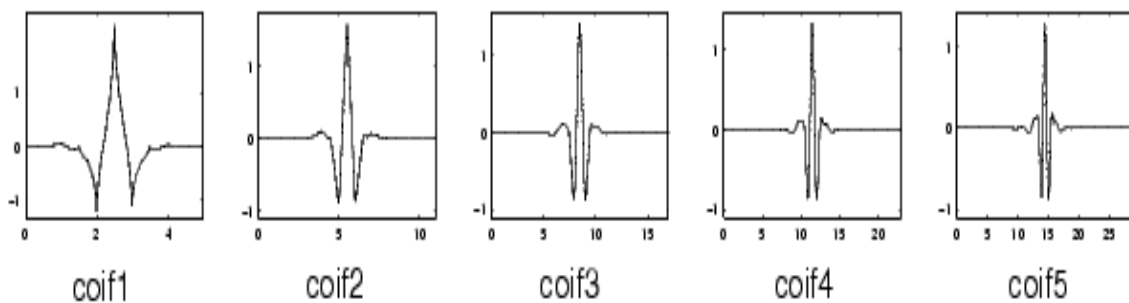


Figura I.58 - Família Wavelet de Coifman (Coiflet) [30].

I.4.4.5 - Wavelet Simétrica (Symlet)

A análise para este tipo de wavelet é ortogonal, que tem comprimento do suporte compacto da ordem de $2N-1$, sendo o número de momentos vanishing de ordem N . As funções apresentam assimetria razoável e regularidade. Esta família possibilita a utilização de **TWC** e **TWD**, além da característica de biortogonalidade e ortogonalidade, conforme figura I.59.

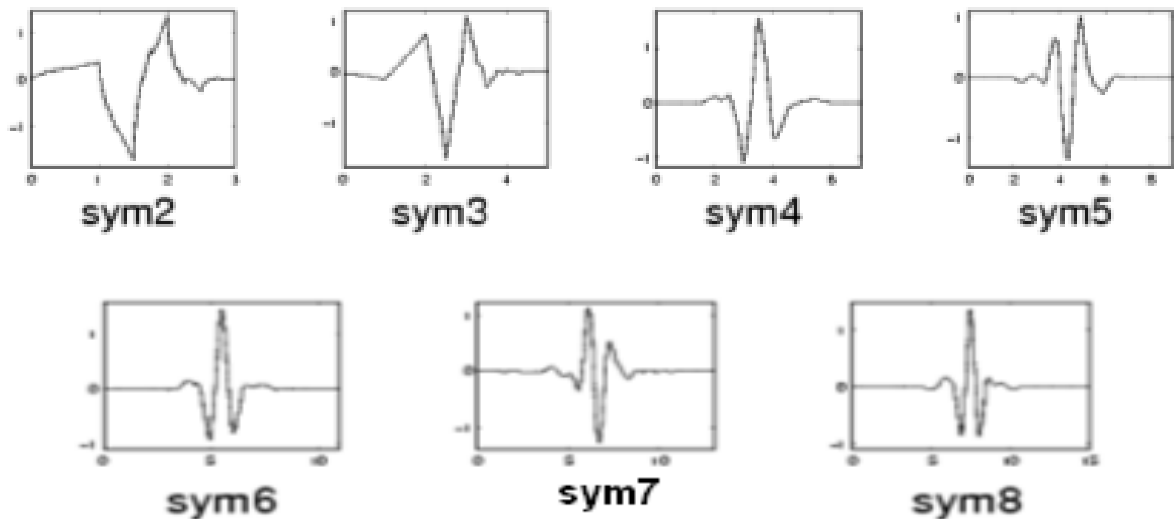


Figura I.59 - Família Wavelet Simétrica (Symlet) [30].

I.4.4.6 - Wavelet de Morgan (Morlet)

A análise para este tipo de wavelet é não ortogonal, que não tem comprimento do suporte compacto, sendo a largura do suporte infinito. Estas wavelets apresentam simetria e possibilidade de utilização de **TWC** e não de **TWD**, além da não ortogonalidade e não biortogonalidade, conforme figura I.60.

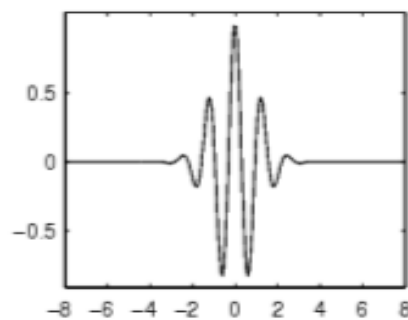


Figura I.60 - Wavelet de Morgan (Morlet) [30].

I.4.4.7 - Wavelet Chapéu Mexicano (Mexican Hat)

A análise para este tipo de wavelet é não ortogonal, que não tem comprimento de suporte compacto e largura de suporte infinito. Estas wavelets apresentam simetria, sendo que possibilitam a utilização de **TWC** e não de **TWD**, além da não ortogonalidade e não biortogonalidade, conforme figura I.61.

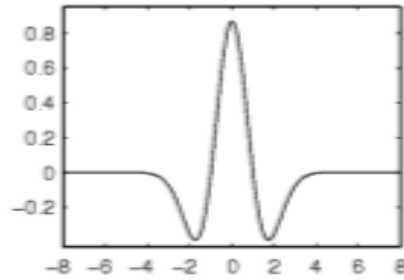


Figura I.61 - Wavelet Chapéu Mexicano (Mexican Hat) [30]

I.4.4.8 - Wavelet de Meyer

A análise para este tipo de wavelet é ortogonal, sem suporte compacto. Estas wavelets apresentam simetria e largura de suporte infinita. A regularidade da wavelet é derivável indefinidamente. Esta família possibilita a utilização de **TWC** e **TWD** com restrições à **TWR**, além da ortogonalidade e biortogonalidade, conforme figura I.62.

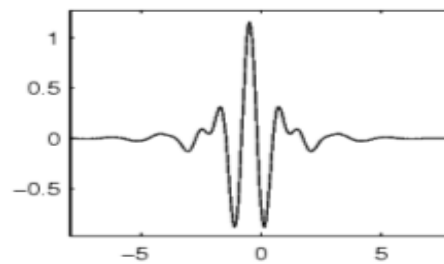


Figura I.62 - Wavelet de Meyer [30].

I.4.4.9 - Wavelet Gaussiana

Estas wavelets são derivadas da função de densidade de probabilidade Gaussiana e não tem suporte compacto. Estas wavelets apresentam simetria e largura de suporte infinita. Esta família possibilita a utilização de TWC e não da TWD, além da não ortogonalidade e não biortogonalidade, conforme figura I.63.

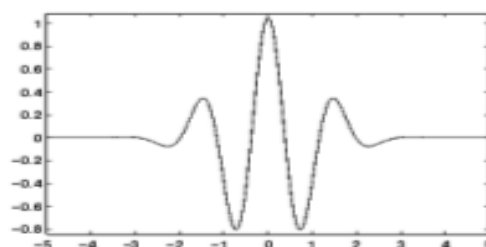


Figura I.63 - Wavelet Gaussiana [30].

I.4.5 - Famílias Wavelets diversas

As wavelets, descritas a seguir, são oriundas de outras wavelets mencionadas nos itens anteriores, servindo apenas de referência para a complementação do assunto, onde são empregadas em situações mais específicas, tais como, Splines e similares.

I.4.5.1 - Wavelet Gaussiana Complexa

Estas wavelets são estabelecidas a partir da aplicação da derivada de uma função complexa Gaussiana. Estas wavelets apresentam características de decomposição do eixo real e imaginário, conforme mostrado na figura I.64, além de manutenção das outras peculiaridades.

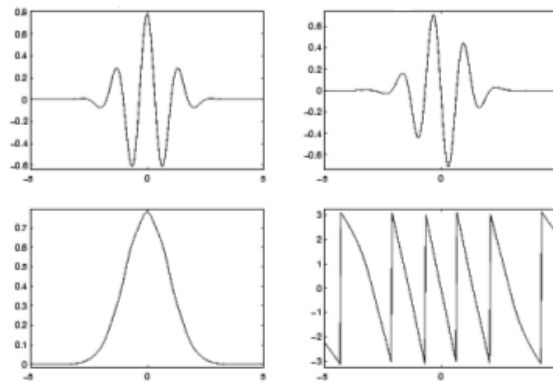


Figura I.64 - Wavelet Gaussiana Complexa [30].

I.4.5.2 - Wavelet de Morgan Complexa

A análise para este tipo de wavelet é definida pela dependência de um parâmetro de largura de banda e centro de frequência. Estas wavelets a exemplo das anteriores apresentam características particulares, conforme mostrado na figura I.65.

Esta wavelet também tem a peculiaridade do fato de sua geração ser oriunda de uma convolução ou multiplicação de uma função exponencial complexa e uma função gaussiana.

Uma das características da wavelet complexa é a propriedade de identificação do movimento oscilatório, além de possibilitar a aquisição de valores de amplitude e fase de um sinal. Além disso, apresenta a propriedade de apresentar simetria ou assimetria, variações e comportamentos opostos em relação ao tempo.

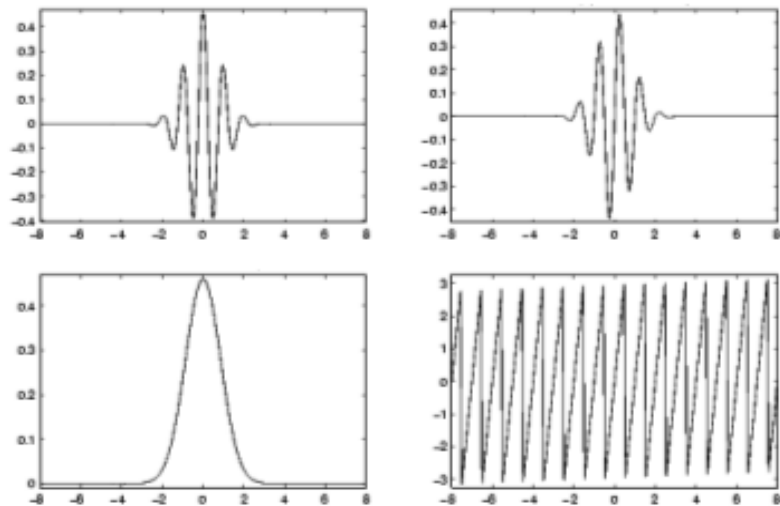


Figura I.65 - Wavelet de Morgan Complexa [30].

I.4.5.3 - Wavelet de Shannon Complexa

A análise para este tipo de wavelet é definida pela dependência de um parâmetro de largura de banda e centro de frequência. Estas wavelets apresentam características de decomposição, quando plotadas a partir dos eixos real e imaginário, conforme mostrado na figura I.66, além de manutenção das outras características peculiares.

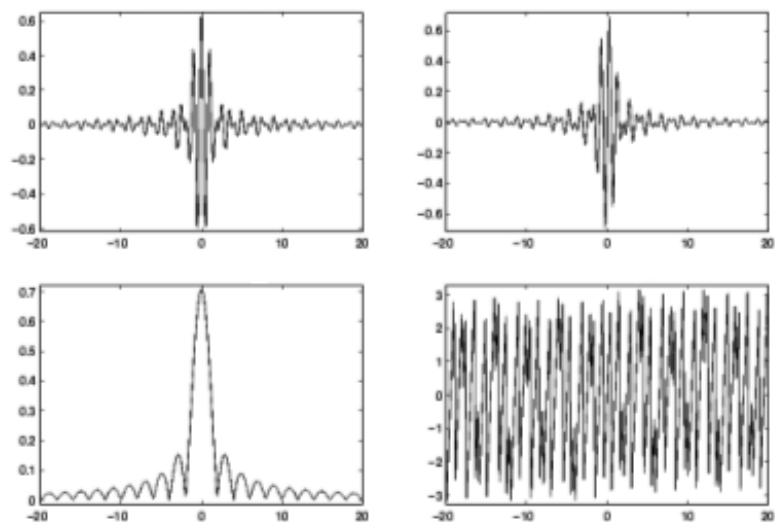


Figura I.66 - Wavelet de Shannon Complexa [30].

CAPÍTULO II - MATERIAIS E MÉTODOS

II.1 - METODOLOGIA DE EXECUÇÃO

A simulação em laboratório procura retratar, da maneira mais fiel possível, uma determinada condição de funcionamento, de modo que possa permitir a obtenção de um resultado conclusivo, estabelecer um conceito ou uma regra de ocorrência e a partir daí, gerar uma massa crítica para um paradigma, mesmo que, por essência, seja provisório. Na simulação são incluídos os principais elementos, definição dos métodos e procedimentos, que possam contribuir decisivamente para o resultado final do objetivo a ser alcançado.

Na transcorrência da descrição dos métodos mostrar-se-ão tanto as especificações dos materiais utilizados, quanto às respectivas funções desempenhadas pelos mesmos na modelagem do processo, além das relações indiretas para obtenção dos padrões esperados.

Uma visão geral do protótipo é mostrada na figura II.1, que apresenta em primeiro plano a simulação de escoamento bifásico ar-água e, em segundo plano, os equipamentos de aquisição do sinal de eco de fundo.



Figura II.1 - Visão geral do protótipo [1].

A caracterização do processo visada neste trabalho consiste estabelecer a correlação entre a aquisição do sinal de eco de fundo e a extração de resíduos, correspondentes às interferências das bolhas com o **Sinal Ultra-Sônico (SUS)**, que é representada pela amplitude do espectro de energia dos mesmos.

A experiência divide-se em duas partes: na primeira parte, a representação da condição de escoamento bifásico é obtida pela geração de bolhas com tamanhos diversos numa coluna vertical de água, a partir de insuflamento de ar com vazão pré-estabelecida e na segunda parte, a caracterização do escoamento em função da geração e propagação de **Ondas Ultra-Sônicas (OUS)** através da coluna vertical de água, aquisição, medição e processamento do sinal de eco de fundo produzido pela interferência com o escoamento aleatório das bolhas geradas.

II.2 - MONTAGEM DO PROTÓTIPO

A representação do processo utiliza um protótipo, construído no Laboratório de Ultra-Som do **CEFET-RJ**, tendo por objetivo proceder à simulação de um escoamento vertical em equipamento de processo, como por exemplo, a de um reator nuclear, compreendendo a geração de bolhas, emissão de **SUS**, aquisição de sinal de eco de fundo, processamento do sinal, obtenção de espectros de energia dos resíduos e plotagem das curvas de comportamento do processo, de modo a possibilitar a definição dos parâmetros, que contribuirão para a caracterização do escoamento bifásico ar-água.

A simulação neste trabalho compreende o processamento dos sinais de eco de fundo obtidos, conforme já referenciado pela citação de trabalhos anteriores, cujo esquemático da composição da estrutura do protótipo está apresentado na figura II.2, que será detalhadamente abordado nos passos seguintes, onde apresentar-se-á dimensões dos equipamentos, especificações técnicas, principais características, métodos empregados, formando um simulador capaz de proporcionar uma representação do fenômeno pesquisado.

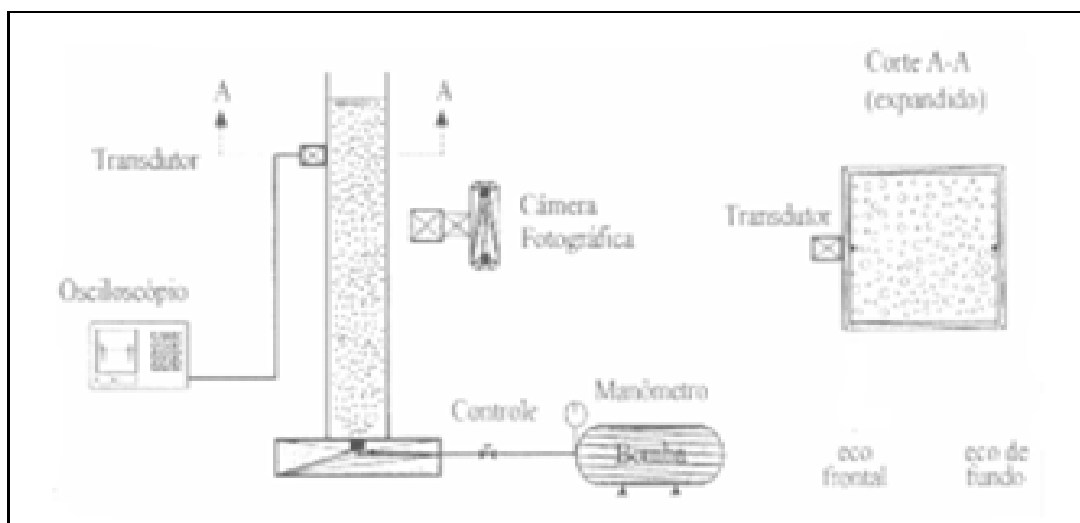


Figura II.2 - Esquemático do protótipo [2].

II.3 - GERAÇÃO DE ESCOAMENTO DE BOLHAS

A geração de bolhas é executada pelo bombeamento de ar através de uma bomba rotativa, de fabricação Primar, modelo 141/2VC, com potência de 1/4 de CV. Além disso, incorpora-se um filtro de ar e um controlador de vazão, de fabricação Dover, modelo 124CPA3008, um medidor de rotações (rotâmetro) de fabricação Omel, modelo "1P", escala 0 a 2NI/min, precisão $\pm 0,5 \%$, repetibilidade de $\pm 0,5 \%$, conforme figura II.3.

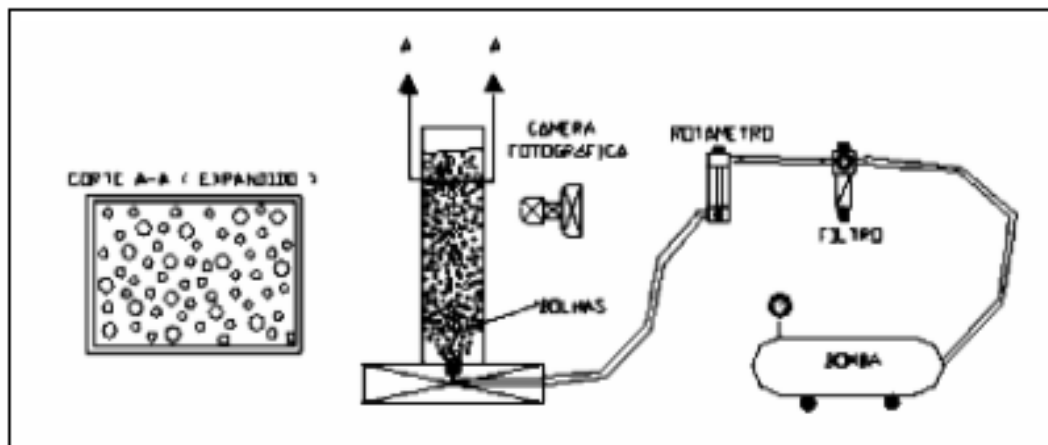


Figura II.3 - Simulação de geração de bolhas [2].

O escoamento característico resultante da simulação de geração de bolhas está representado na figura II.4 (a), que se configura como aquele utilizado para a caracterização de escoamentos bifásicos, no caso específico a de um perfil com distribuição vertical de bolhas, que foi considerado como tipo de escoamento ocorrido num circuito de refrigeração de reator nuclear, que apresenta uma conformação mais homogênea da relação entre a distribuição e quantidade de bolhas e o meio líquido.

A obtenção deste tipo de escoamento realiza-se através da utilização de uma coluna vertical de acrílico transparente de 700 mm de altura, na forma de um prisma retangular, apoiada numa base também retangular, medindo 50 mm na largura, 80 mm no comprimento e dividida em três partes. Na parte inferior da coluna vertical encontram-se instalados os obturadores, que são os orifícios de diversos diâmetros; 0,45 mm, 0,55 mm, 0,70 mm e 0,80 mm, sendo os responsáveis pela saída da vazão de ar gerada pela bomba de ar, conforme pode ser visto na figura II.5.

O escoamento típico das bolhas está representado na figura II.4 (a), que corresponde ao tipo de escoamento bifásico a ser caracterizado na metodologia empregada no processo de caracterização descrito neste trabalho.

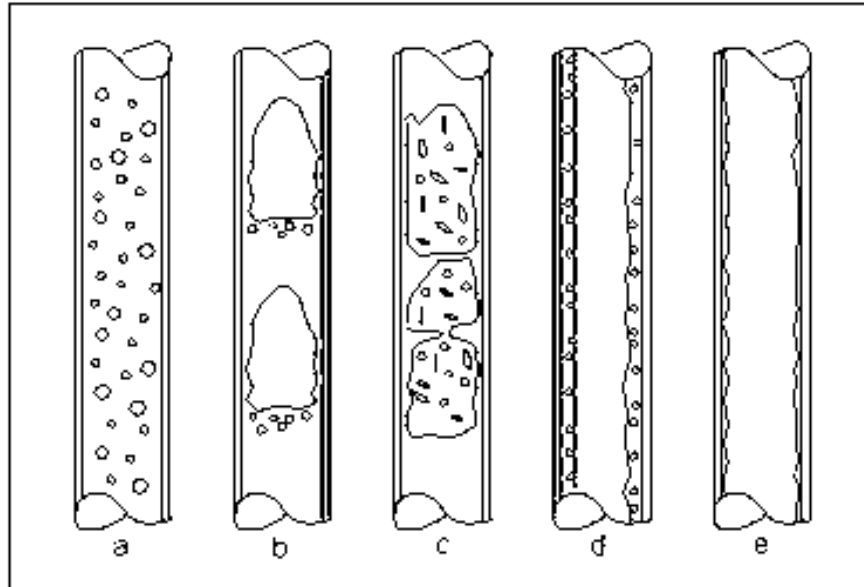


Figura II.4 - Representação de escoamentos bifásicos em condutos verticais [2].

Além disso, são apresentados outros escoamentos típicos de processos, tais como os descritos a seguir; na figura II.4 (b) o escoamento pistonado; na figura II.4 (c) o escoamento agitado; na figura II.4 (d) o escoamento anular com bolhas e na figura II.4 (e) o escoamento anular. A comprovação da escolha está registrada nas fotografias II.6 a II.9, através dos diversos experimentos executados para justificativa da adoção do modelo.

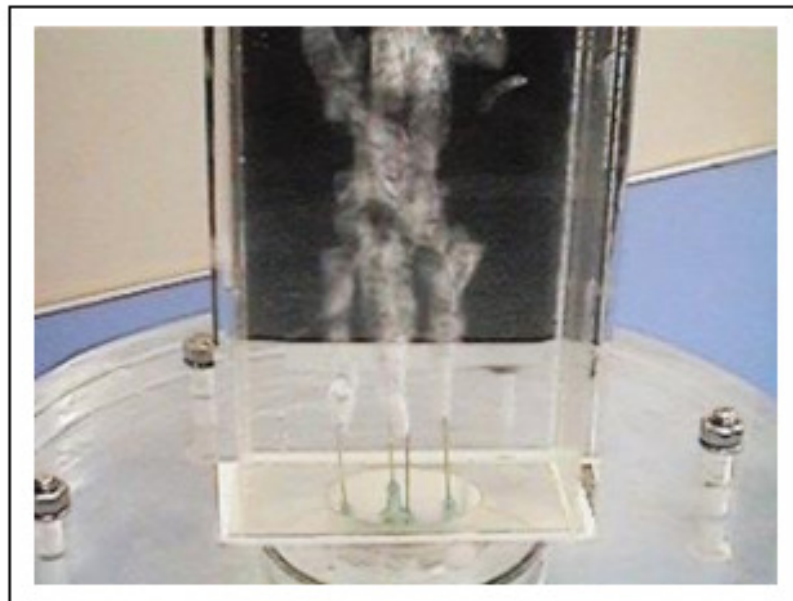


Figura II.5 - Simulação de escoamento bifásico em conduto vertical [2].

O comportamento das bolhas apresenta características de ordem randômica ou aleatória e onde apoiam-se os experimentos que retratem os perfis nos quais o processo possa ser modelado, para permitir uma análise generalizada em torno do foco principal de caracterização do escoamento bifásico analisado, que pode advir em consequência de falhas estruturais e descontinuidades de condutos de fluidos. As fotos das bolhas geradas pelos diversos escoamentos estão mostradas nas figuras II.6 a II.9, que são resultantes da combinação de vazão x diâmetro do obturador empregada no protótipo, referenciados nos trabalhos de MELO[1] e CUNHA FILHO[2].

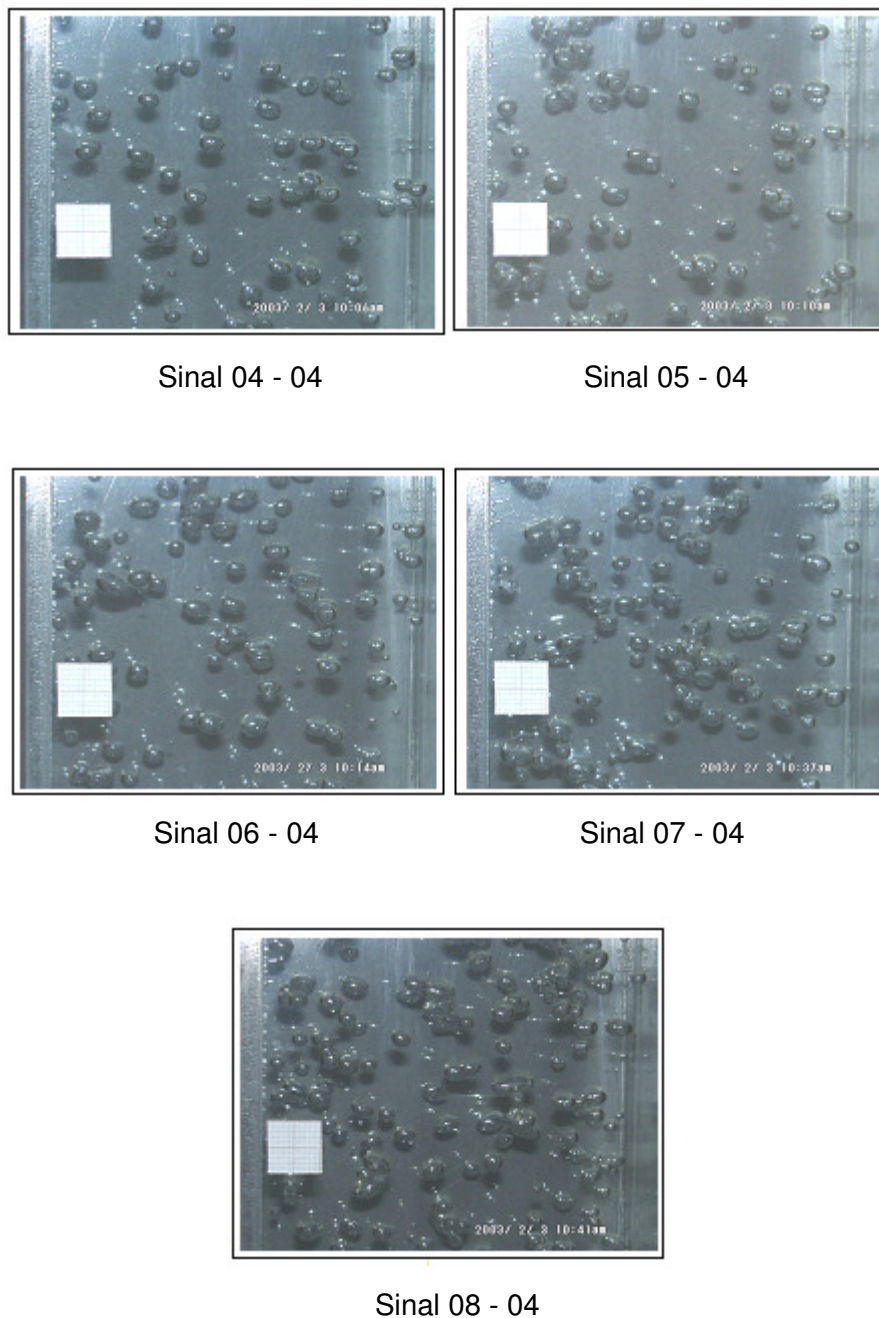
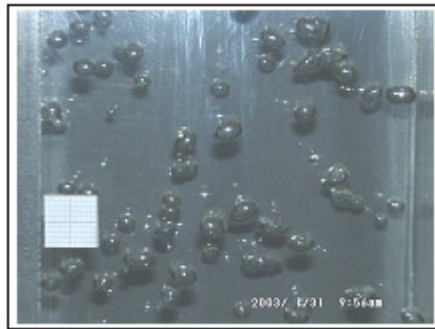
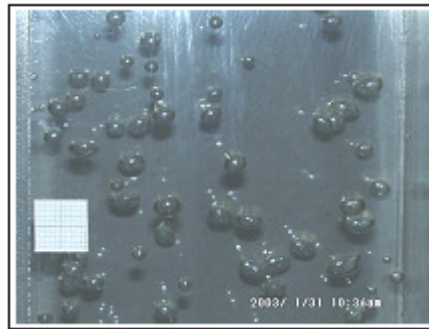


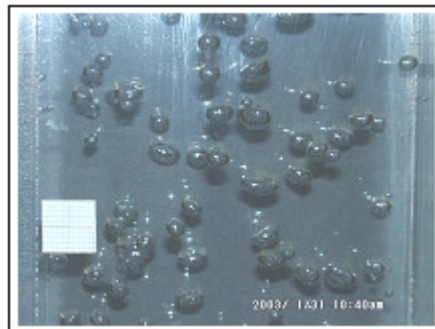
Figura II.6 - Escoamento das bolhas Vazão variável x Diâmetro $D=0,45$ mm [2].



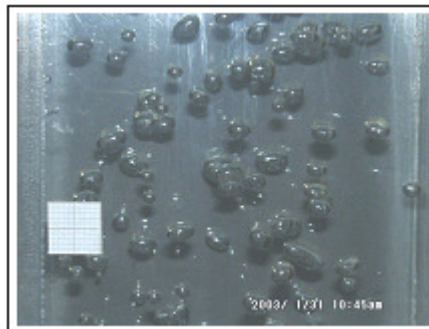
Sinal 04 - 05



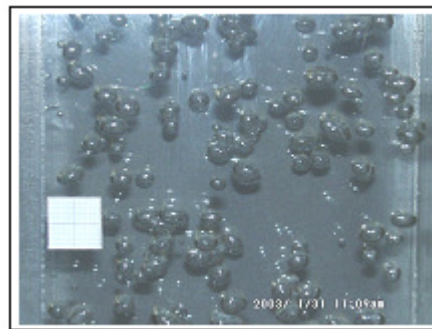
Sinal 05 - 05



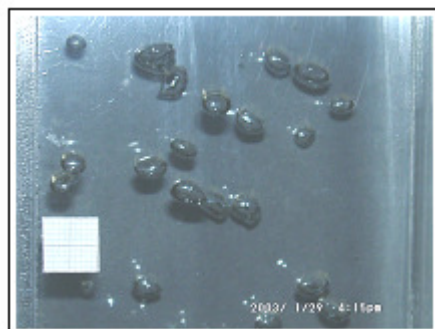
Sinal 06 - 05



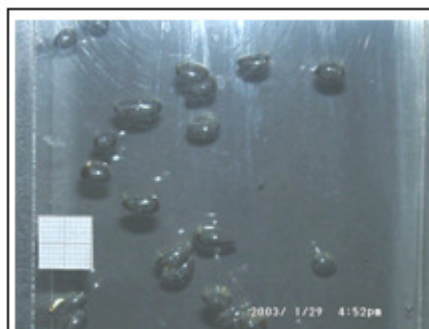
Sinal 07 - 05



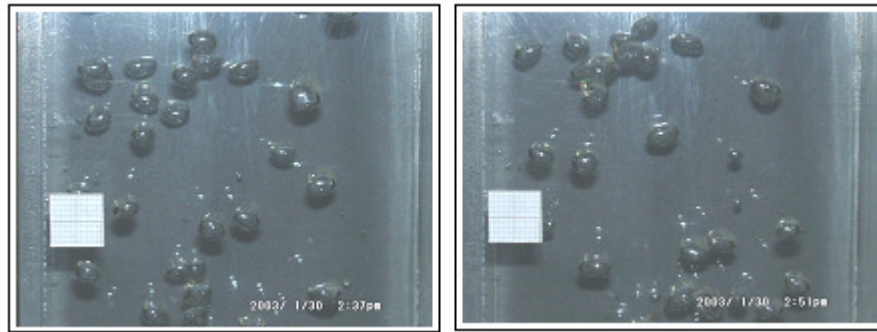
Sinal 08 - 05

Figura II.7 - escoamento das bolhas Vazão variável x Diâmetro $D=0,55$ mm [2].

Sinal 04 - 07

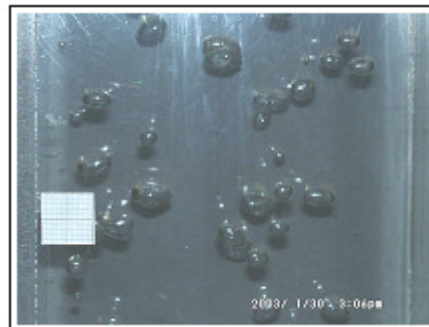


Sinal 05 - 07

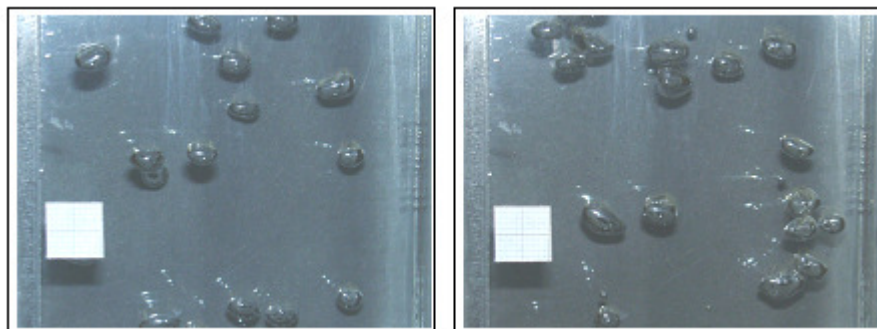


Sinal 06 - 07

Sinal 07 - 07

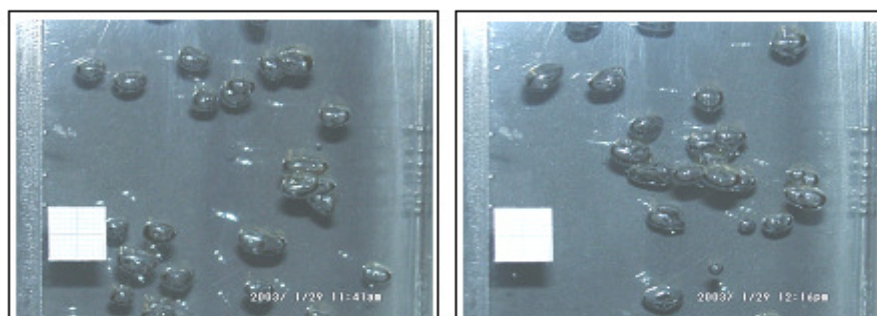


Sinal 08 - 07

Figura II.8 - escoamento das bolhas Vazão variável x Diâmetro $D=0,70$ mm [2].

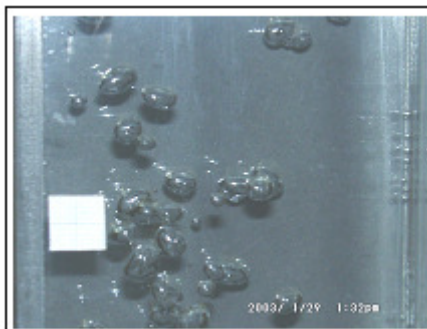
Sinal 04 - 08

Sinal 05 - 08



Sinal 06 - 08

Sinal 07 - 08



Sinal 08 - 08

Figura II.9 - Escoamento das bolhas Vazão variável x Diâmetro $D=0,80$ mm [2].

II.4 - TÉCNICA ULTRA-SÔNICA

Para melhor acompanhamento deste trabalho apresentar-se-á uma síntese das propriedades e particularidades do ultra-som, com o intuito de realçar pontos específicos, que possam reforçar a importância da pesquisa. Ao utilizar-se teste por **Ultra-Som (US)** por ser não destrutivo, não invasivo, permite a execução do ensaio mesmo com o sistema em operação e este é um fator de relevante importância, pois contribui para o aumento de pesquisa e acervo técnico no campo da caracterização de processos e detecção de falhas ou discontinuidades.

II.4.1 - Ultra-som

As ondas ultra-sônicas são geradas a partir de um transdutor de 5 MHz, banda larga, marca NDT Systems Inc, com cristal piezolétrico circular de 6,35 mm (1/4") de diâmetro. As propriedades e efeito piezo-elétrico do quartzo, transformam as tensões surgidas pela ocorrência deste fenômeno em vibração da estrutura molecular do material, provocando a propagação de ondas mecânicas, que deste modo deslocam-se no fluido, com velocidade definida.

II.4.2 - Campo ultra-sônico

A atenuação ocorrida nos líquidos pode ser função de fatores de relações direta e / ou indireta, de acordo com a condição do meio líquido ou ambiente, pois a velocidade é dependente do meio líquido e não das características da própria onda.

Fator de relação direta:

- viscosidade do líquido.

Fatores de relação indireta:

- temperatura do líquido;
- presença de bolhas;
- tipo de escoamento do líquido;
- vibrações no meio líquido.

II.4.3 - Técnica pulso-eco

O método pulso-eco consiste na emissão de pulsos de **US** em determinado meio de propagação, em intervalos regulares de tempo e a execução da recepção total ou parcial da onda atenuada, em virtude de perdas de energia devido às diferenças das impedâncias acústicas entre os meios de propagação, sendo o meio líquido, considerado em nosso trabalho, como o principal meio de propagação.

A propagação de **OUS** apresenta características próprias de comportamento, em razão da forma geométrica do meio, da existência de partículas em suspensão e ocorrência de sistemas bifásicos.

A onda incidente refletida por uma superfície perpendicular à direção de propagação pelas bolhas ou parede do recipiente mantém suas características de energia, percurso e velocidade.

Fenômeno de reflexão:

- ocorre com pequena transmissão de energia ao meio líquido, diminuição da amplitude da onda e alteração na fase ou ângulo de incidência da mesma.

Fenômeno de refração:

- ocasiona uma alteração na direção de propagação da onda, ao atravessar um sistema bifásico, ou seja, meios de composições diferentes, ocasionando alteração no comprimento de onda para adequação à nova velocidade de propagação e mantendo o mesmo valor da frequência de oscilação da onda (Lei de Snell).

$$\frac{\text{sen}A_I}{\text{sen}A_T} = \frac{V_1}{V_2} \quad (\text{II.1})$$

Fenômeno de difração:

- ocorre quando a onda atravessa obstáculos de tamanho finito localizados no percurso da mesma.

Não se pode deixar de mencionar que a aquisição do sinal não é integral, pois o sinal emitido sofre atenuação no retorno ao transdutor, a perda de energia é progressiva em razão

de vários motivos, dentre os quais, perdas térmicas na ocorrência da propagação das **OUS**. Um exemplo de medição de **SUS** refletido no transdutor e convertido para o osciloscópio é apresentado na figura II.10.

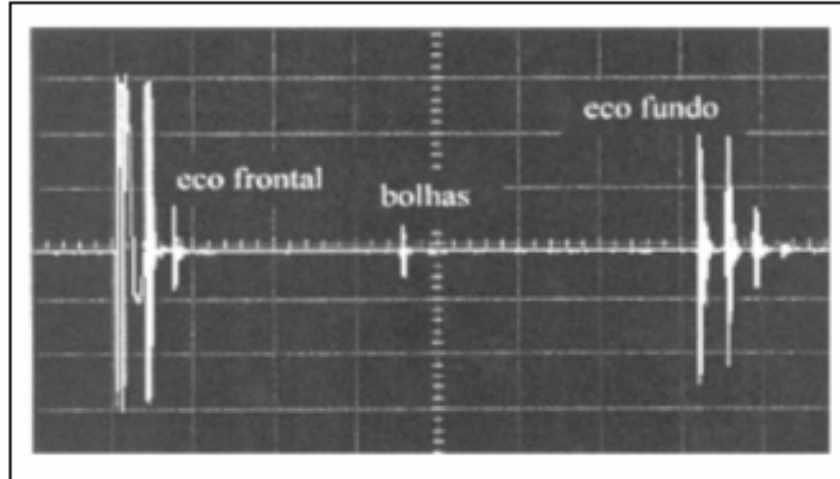


Figura II.10 - Representação de ecos de fundo [1].

II.4.3.1 - Eco frontal

A forma de onda do eco frontal encontra-se na parte inicial da figura II.10, que é devido à interferência com o primeiro obstáculo do sinal, que corresponde à impedância de meio diferente da parede do recipiente.

II.4.3.2 - Eco das bolhas

A forma de onda do eco das bolhas está apresentada na parte central da figura II.10, que representa a atenuação da **OUS** pelas bolhas originárias do escoamento ascendente entre as paredes do recipiente, presentes no meio líquido de impedância diferente.

II.4.3.3 - Eco de fundo

O sinal de eco de fundo, que se encontra na parte final da figura II.10, mostra a atenuação da **OUS** pela diferença das impedâncias da parede de fundo e do meio líquido. O sinal ultra-sônico emitido é modificado pelas interferências provocadas pelo escoamento vertical das bolhas. A partir da aquisição do sinal de eco de fundo e processamento do mesmo, tem-se a possibilidade de caracterização do escoamento bifásico pelas características dos resíduos identificados na filtragem do sinal, por conta da presença de bolhas no meio líquido.

II.5 - AQUISIÇÃO DE SINAL

O diagrama esquemático do sistema de geração de ultra-som e aquisição de sinal é mostrado na figura II.11, sendo composto por um osciloscópio fabricação Hewlett Packard, modelo 54616B de 500 MHz e uma placa tipo “pulser-receiver” de fabricação Physical Acoustic Corporation, modelo PAC IPR 100, um aparelho gerador de funções de fabricação Stanford Research Systems, modelo DS345 de 30 MHz e um transdutor de 5 MHz, banda larga, marca NDT Systems Inc, com cristal piezelétrico circular de 6,35 mm (1/4”) de diâmetro.

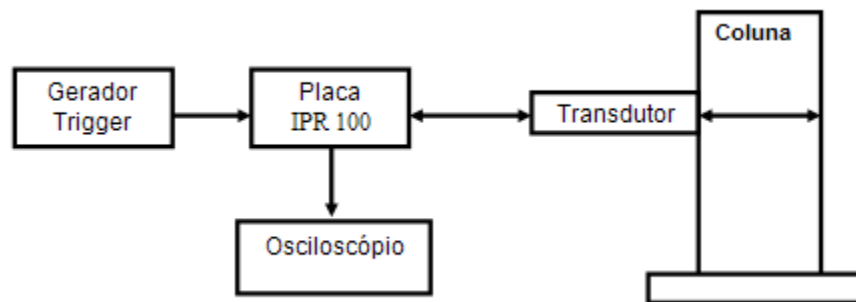


Figura II.11 - Diagrama esquemático do sistema de aquisição de sinal [2].

Os sinais sem bolhas e com bolhas obtidos a partir da saída do osciloscópio são transformados digitalmente, através de um conjunto composto por um micro-computador Pentium e o software HP 348108 BenchLink Scope, definindo pontos de amostragem de amplitude versus tempo.

Os sinais de aquisição são armazenados em arquivo **Excell**, em formato “.csv”, posteriormente transformados em arquivos de formato “.txt”, permitindo a separação dos dados em duas colunas referentes à amplitude de sinal e ao domínio do tempo.

Para a utilização deste sinal sob forma de planilha **Excell**, em arquivo de formato “.m” do **MatLab**, elaborou-se um algoritmo que possibilitasse o armazenamento dos dados na área de trabalho (**Work**) do **MatLab**, e daí ao acesso do sinal para carregamento no simulador de processamento de sinais uni-dimensionais para análise Wavelet.

II.5.1 - Aquisição de sinal de eco de fundo sem bolhas

Os sinais de eco frontal e de fundo da simulação sem bolhas, conforme figura II.12, foram plotados a partir da saída do osciloscópio e posterior digitalização dos valores de amplitude versus tempo, resultando na forma de onda do sinal. A primeira curva desta figura, que se encontra posicionada à esquerda, representa o sinal de eco frontal refletido pela parede

frontal do recipiente da coluna d'água e na segunda figura o sinal de eco de fundo refletido pela parede do fundo do mesmo recipiente.

Como não existem bolhas, não existe a forma de onda da interferência das mesmas com o **SUS**, entre o eco frontal e o eco de fundo, cuja comparação pode ser feita com esta mesma figura II.12 em relação à figura II.10.

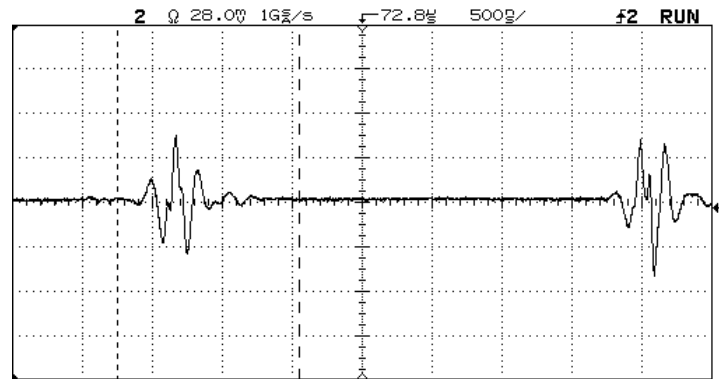


Figura II.12 - Aquisição de eco frontal e de fundo do sinal sem bolhas.

O sinal ultra-sônico de eco de fundo referente ao sinal sem bolhas, encontra-se representado na figura II.13. Estas identificações serão utilizadas, de modo a facilitar a pronta associação com o processamento dos diversos sinais de eco de fundo.

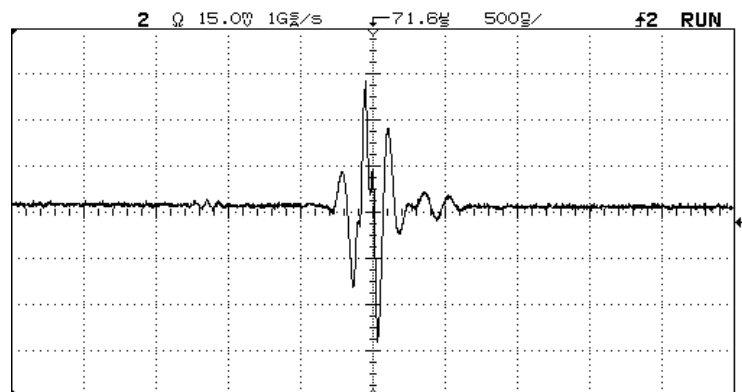


Figura II.13 - Forma de onda do sinal sem bolhas.

II.5.2 - Aquisição de sinais de eco de fundo com bolhas

Os sinais de eco de fundo obtidos pela medição executada através do osciloscópio, estão identificados em função dos diâmetros dos obturadores e valores de vazão de ar insuflado, como mostrado nas tabelas II.1 a II.4 e figuras II.14 a II.33.

Tabela II.1 - Identificação dos códigos dos sinais de aquisição D=0,45 mm.

Código do sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)
04 - 04	0,40	0,45
05 - 04	0,50	0,45
06 - 04	0,60	0,45
07 - 04	0,70	0,45
08 - 04	0,80	0,45

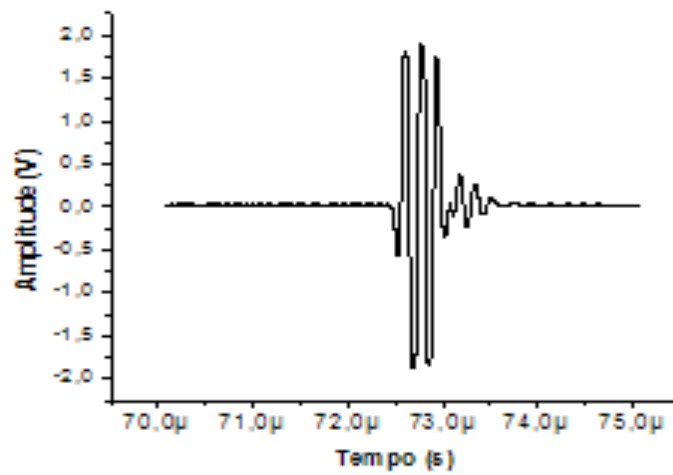


Figura II.14 - Forma de onda do sinal 04 - 04 [2].

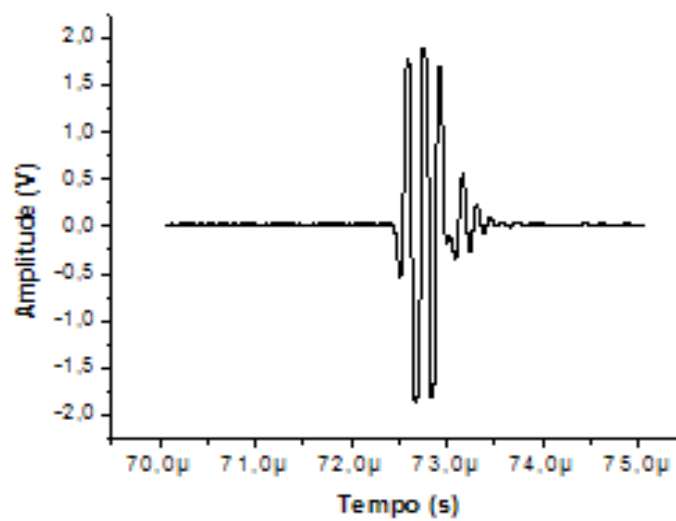


Figura II.15 - Forma de onda do sinal 05 - 04 [2].

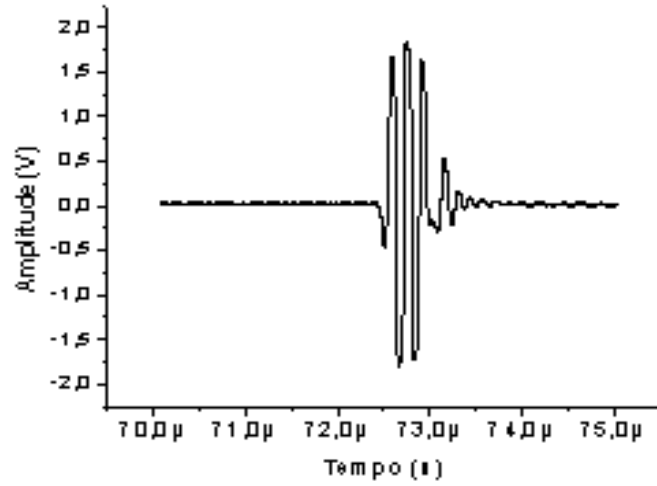


Figura II.16 - Forma de onda do sinal 06 - 04 [2].

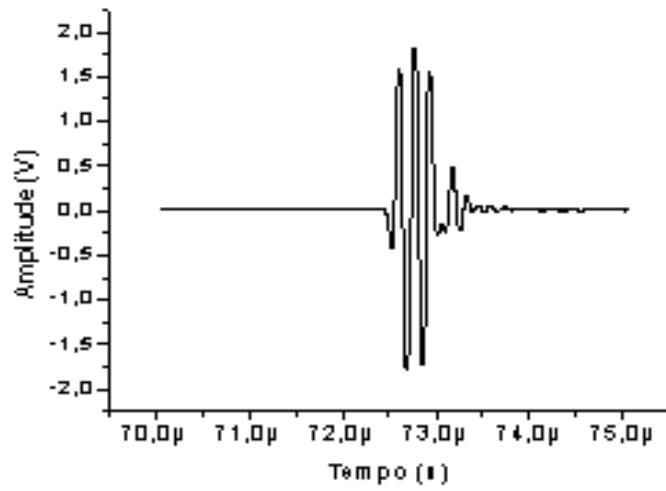


Figura II.17 - Forma de onda do sinal 07 - 04 [2].

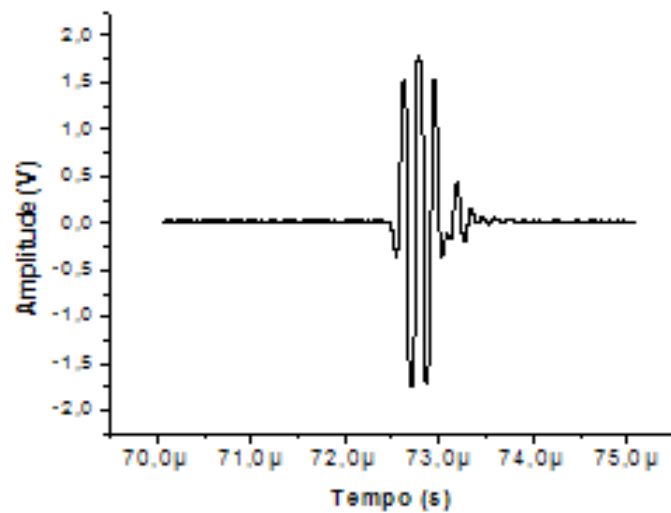


Figura II.18 - Forma de onda do sinal 08 - 04 [2].

Tabela II.2 - Identificação dos códigos dos sinais de aquisição D=0,55 mm.

Código do sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)
04 - 05	0,40	0,55
05 - 05	0,50	0,55
06 - 05	0,60	0,55
07 - 05	0,70	0,55
08 - 05	0,80	0,55

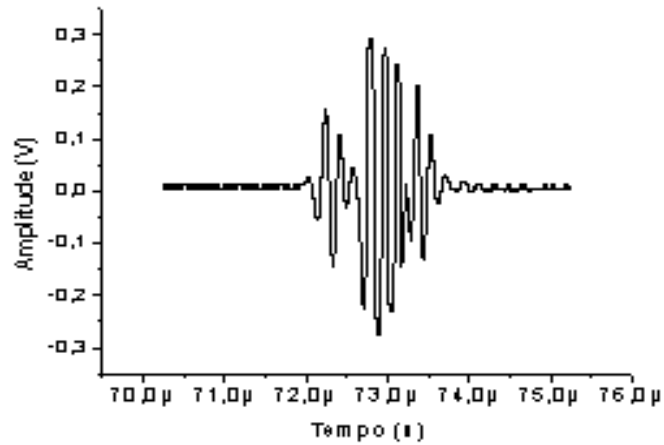


Figura II.19 - Forma de onda do sinal 04 - 05 [2].

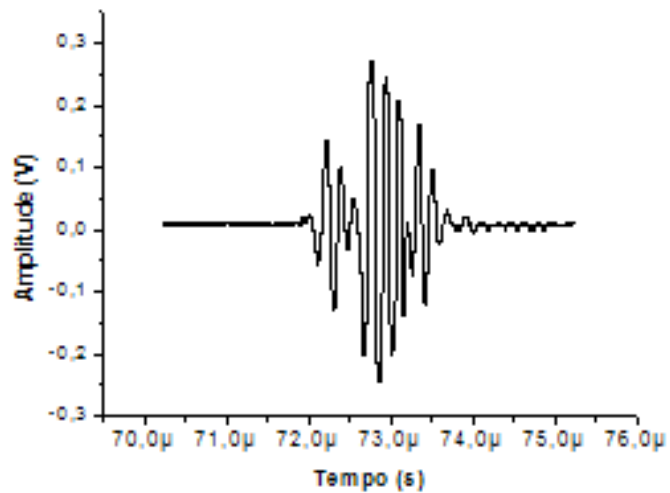


Figura II.20 - Forma de onda do sinal 05 - 05 [2].

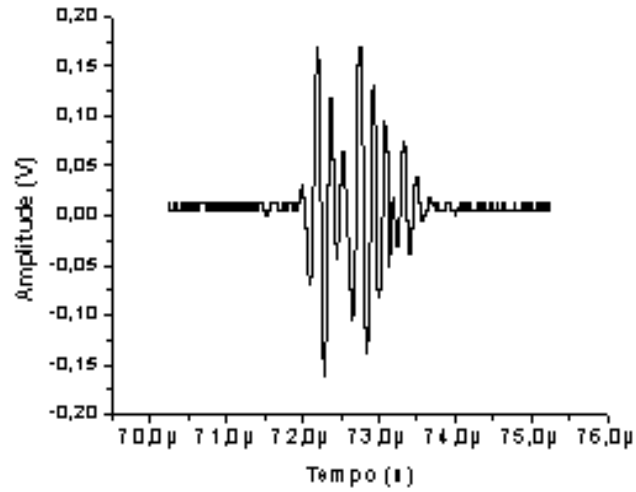


Figura II.21 - Forma de onda do sinal 06 - 05 [2].

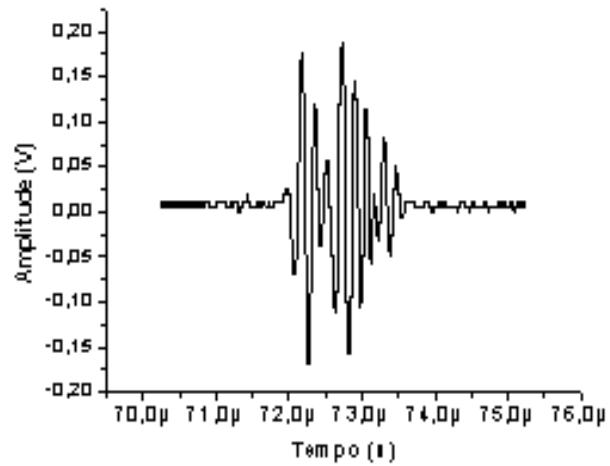


Figura II.22 - Forma de onda do sinal 07 - 05 [2].

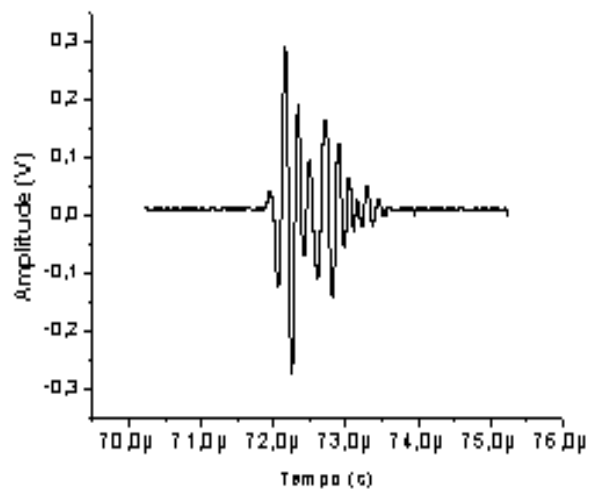


Figura II.23 - Forma de onda do sinal 08 - 05 [2].

Tabela II.3 - Identificação dos códigos dos sinais de aquisição D=0,70 mm.

Código do sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)
04 - 07	0,40	0,70
05 - 07	0,50	0,70
06 - 07	0,60	0,70
07 - 07	0,70	0,70
08 - 07	0,80	0,70

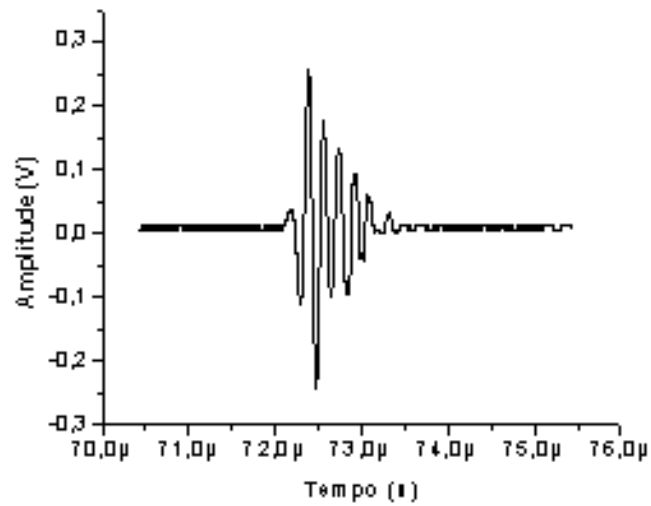


Figura II.24 - Forma de onda do sinal 04 - 07 [2].

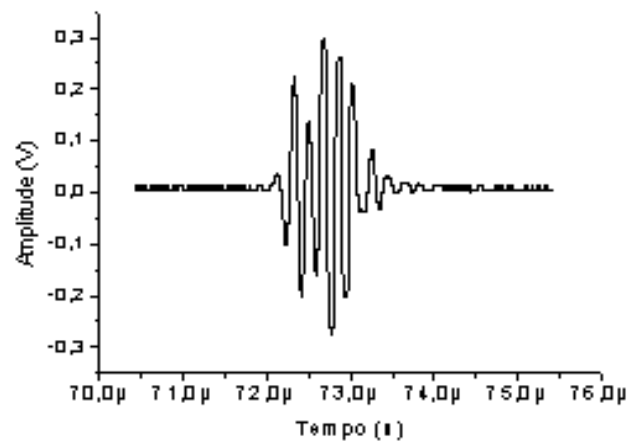


Figura II.25 - Forma de onda do sinal 05 - 07 [2].

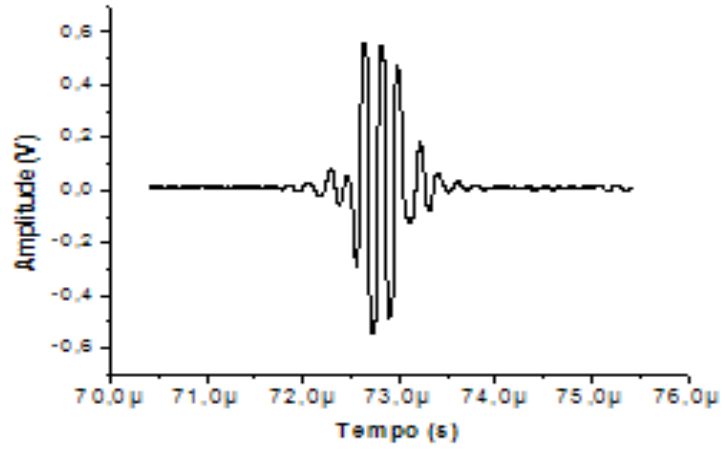


Figura II.26 - Forma de onda do sinal 06 - 07 [2].

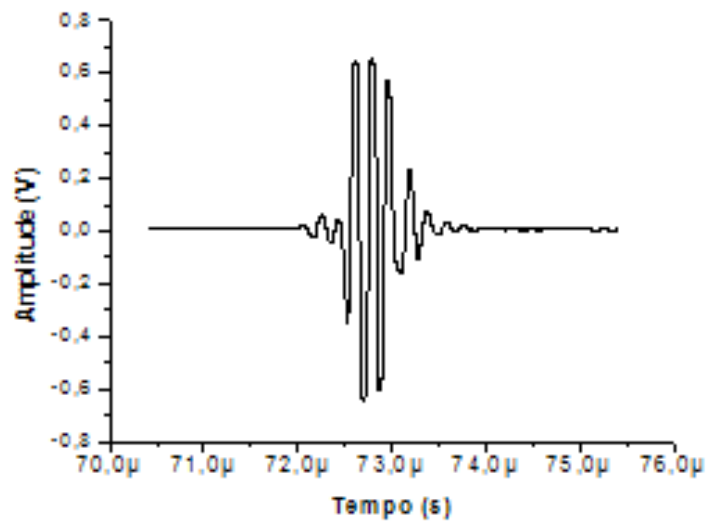


Figura II.27 - Forma de onda do sinal 07 - 07 [2].

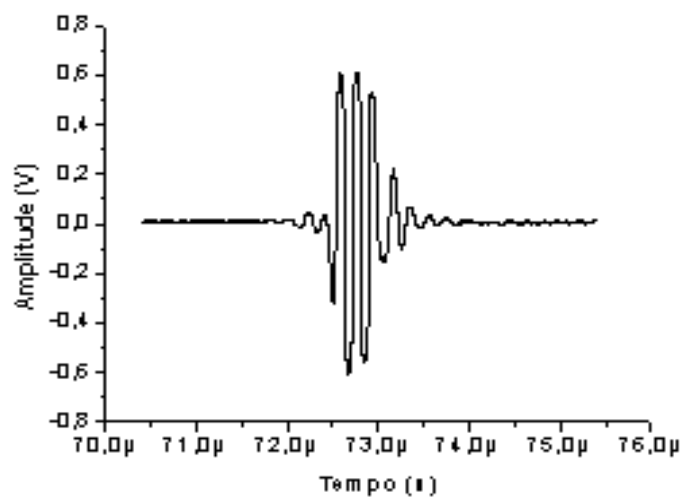


Figura II.28 - Forma de onda do sinal 08 - 07 [2].

Tabela II.4 - Identificação dos códigos dos sinais de aquisição D=0,80 mm.

Código do sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)
04 - 08	0,40	0,80
05 - 08	0,50	0,80
06 - 08	0,60	0,80
07 - 08	0,70	0,80
08 - 08	0,80	0,80

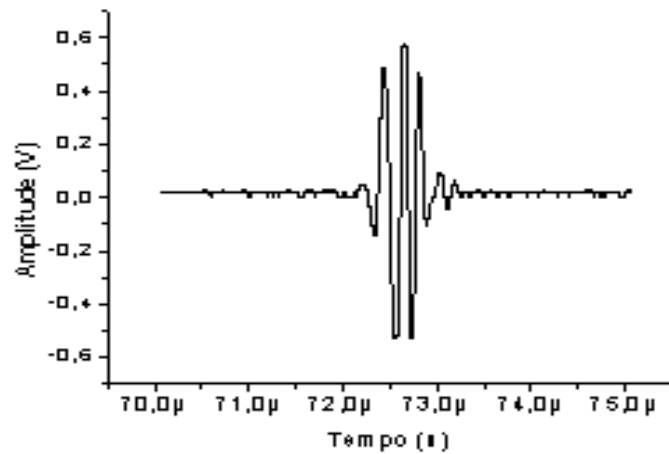


Figura II.29 - Forma de onda do sinal 04 - 08 [2].

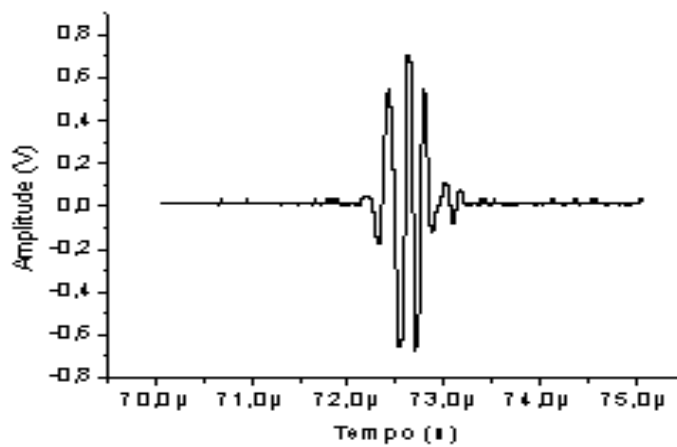


Figura II.30 - Forma de onda do sinal 05 - 08 [2].

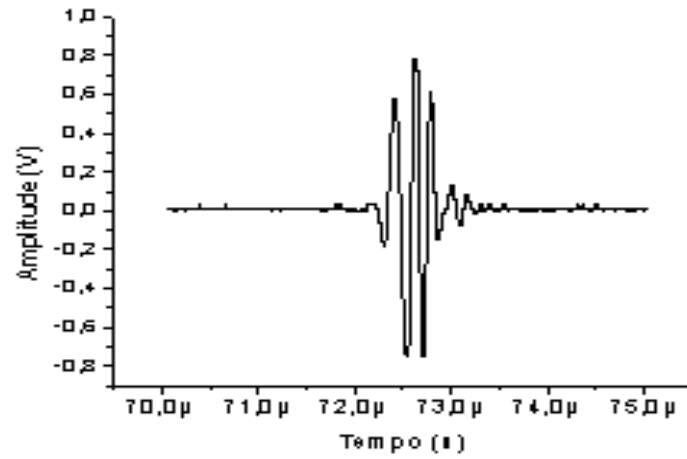


Figura II.31 - Forma de onda do sinal 06 - 08 [2].

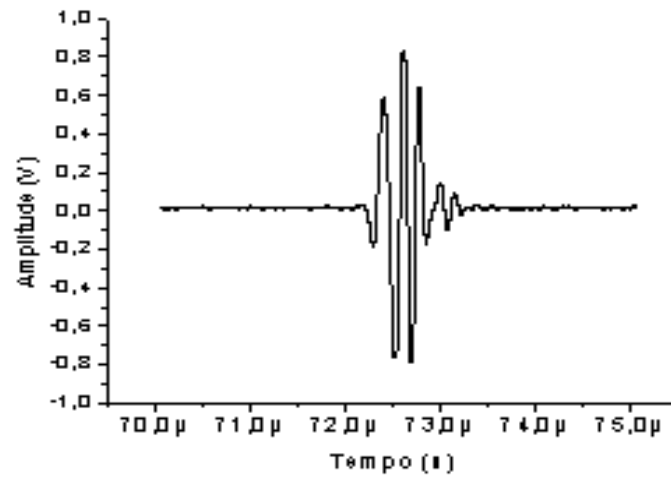


Figura II.32 - Forma de onda do sinal 07 - 08 [2].

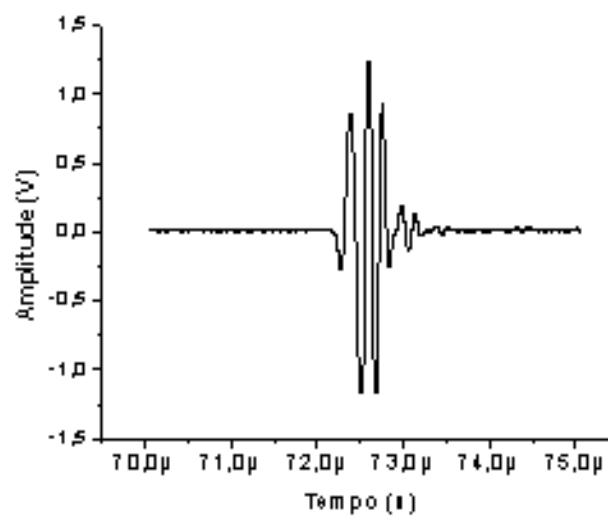


Figura II.33 - Forma de onda do sinal 08 - 08 [2].

II.6 - PROCESSAMENTO DE SINAIS

Para viabilizar o processamento dos sinais de eco de fundo obtidos na caracterização do processo, com a aplicação da **Transformada Wavelet Contínua**, fez-se uso da **Interface Gráfica**, existente no **Software MatLab**, especificamente no compartimento denominado **Wavelet Toolbox Main Menu**, que contempla o algoritmo de decomposição do sinal e de filtragem de ruídos (**De-noise**), sendo a importação do sinal proveniente do osciloscópio aplicada em um tipo específico de análise de sinal previamente definida. [34].



Figura II.34 - Interface Gráfica Wavelet Toolbox [34].

Alguns compartimentos de análise de sinais e imagens podem ser observados na figura II.34, os quais fazem parte da **Interface Gráfica Wavelet Toolbox** e estão disponíveis para as diversas famílias Wavelets empregadas na execução de simulações, envolvendo análise contínua ou análise discreta e desdobrando-se em situações específicas de acordo com os objetivos do processamento dos sinais. Estes desdobramentos podem envolver tanto análise

de sinais quanto de imagens. A análise dos sinais comumente usados em simulação é executada, nas caixas cujos botões de acionamento estão identificados nos compartimentos como **1-D**, ou seja, sinais de uma dimensão. As análises de imagens estão disponíveis nos compartimentos identificados como **2-D**, ou seja, sinais de duas dimensões. [35].

O botão identificado como **Contínuos Wavelet 1-D**, destina-se à execução de vários tipos de análises específicas, correspondentes às famílias Wavelets Contínuas, como por exemplo, identificação de descontinuidades em processos, definição dos ajustes dos valores de escala, obtenção da forma de onda do sinal analisado e coeficientes, a partir de um período de amostragem, para cada família wavelet escolhida para a análise.

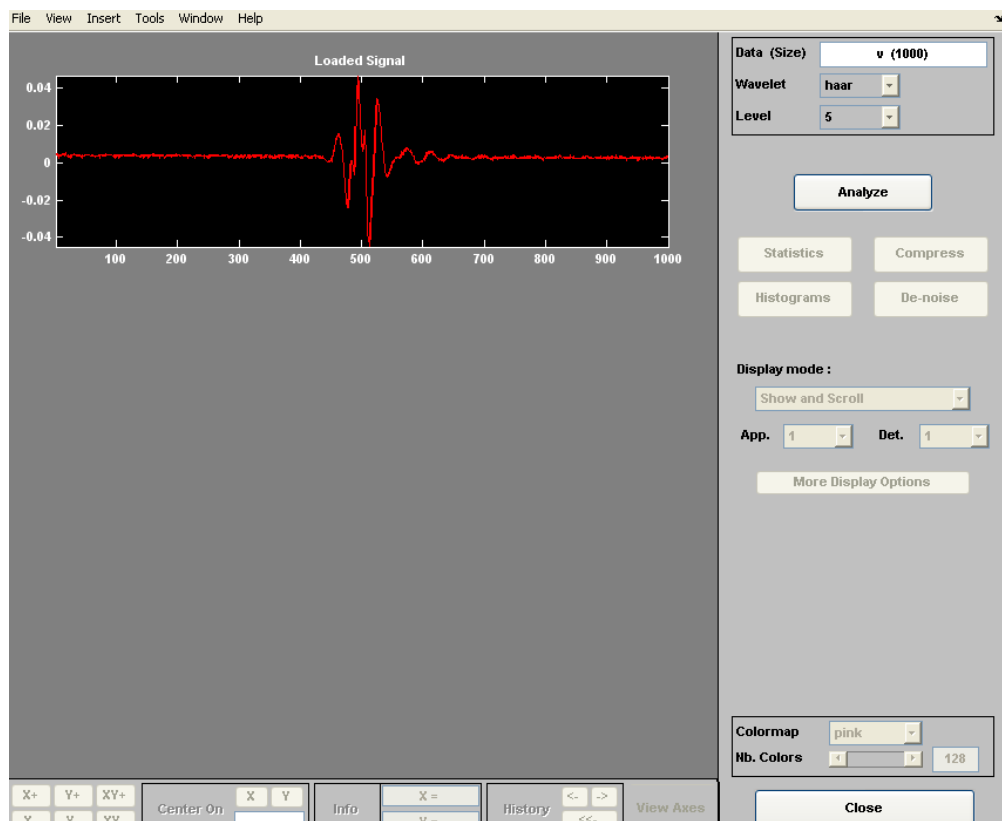


Figura II.35 - Forma de onda do sinal carregado [34].

O compartimento **Wavelet 1-D** permite o carregamento do sinal a ser analisado, de modo a propiciar a plotagem do sinal ensaiado e o respectivo espectro de energia dos resíduos obtidos após a filtragem do mesmo. O carregamento do sinal é executado, clicando-se na caixa de ferramentas o botão **File** e, posteriormente, clicando-se o botão **Signal** e, obtendo-se em consequência, a importação deste sinal armazenado em determinado arquivo no disco rígido do computador. Este botão permite uma análise mais adequada ao tipo de pesquisa a escolher para a caracterização do processo e futuras comparações.

A forma de onda do sinal importado pode ser observada na figura II.35, com as coordenadas de amplitude versus número de pontos de simulação, com o campo de visualização identificado como **Loaded Signal**. Esta janela permite o acesso aos procedimentos de análise do sinal, clicando-se o botão **Analyze**, pronto para uso.

A partir do pressionamento do botão **Analyze** a forma de onda do sinal carregado é desmembrada em formas de onda dos sinais de baixa e alta frequência em função do nível de discretização, com aproximação e número de detalhes, respectivamente, conforme mostrado na figura II.36, através do processo **Exec / Run** do algoritmo de decomposição implícito na **Interface Gráfica Wavelet**, responsável pela análise multi-freqüência do sinal ensaiado.

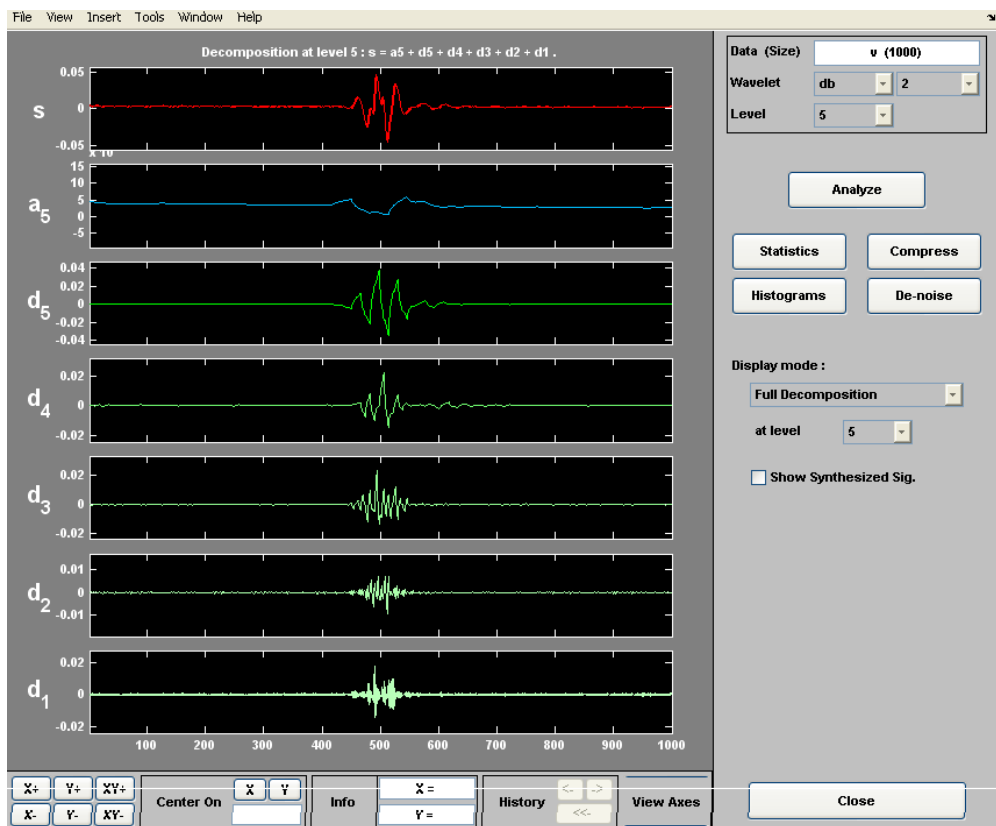


Figura II.36 - Análise multi-freqüência do sinal [34].

Além disso, esta janela funciona como fase de transição para outras análises, tais como: histogramas, estatísticas, compressão de sinais e a própria de-noise. Os diversos botões existentes são os acionadores responsáveis, que ao serem clicados, pela obtenção de análise mais apurada do sinal, de acordo com os interesses da pesquisa e investigação de características marcantes na simulação, de modo a proporcionar o alcance de metas e objetivos pré-estabelecidos na metodologia, construção do protótipo e aquisição do sinal.

O próximo passo é a apresentação de uma tela, que possibilita a execução da filtragem do sinal (**De-noise**) e identificação local de ocorrência de bolhas no processo, conforme está

mostrado na figura II.37, onde se observa a forma de onda do sinal original e os diversos níveis de detalhes devidamente escolhidos para análise.

A execução da filtragem do sinal é necessária para permitir a obtenção de um conjunto de dados do sinal medido isento de ruídos, ou na pior hipótese, sem os ruídos mais significativos em relação ao mesmo.

O procedimento de processamento de sinal continua seu curso, pois o objetivo é encontrar a forma de onda do espectro de energia dos resíduos, sendo necessário definir o caminho adequado para executar a análise do comportamento do sinal utilizando a **TW**, empregada para a caracterização do processo, de modo a possibilitar a obtenção do espectro de energia dos resíduos. Ao clicar-se o botão **De-noise** e, posteriormente, o botão **Residuals** e obtêm-se as curvas esperadas de representação do espectro de energia dos resíduos.

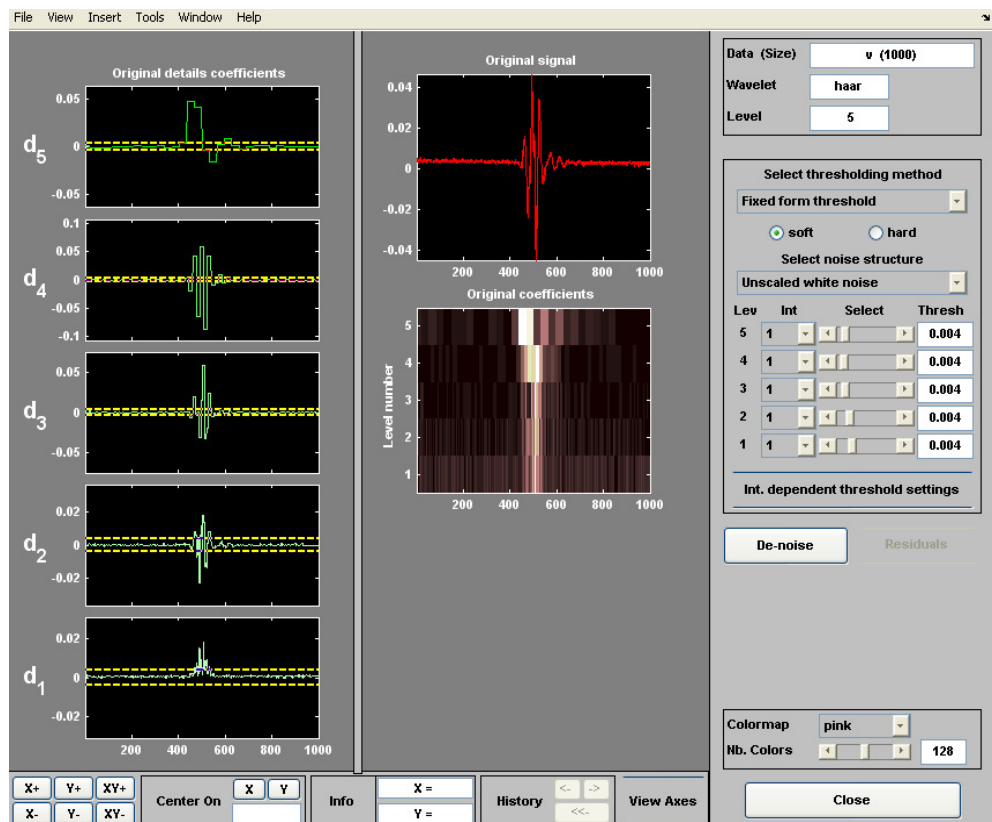


Figura II.37 - De-noise e descontinuidade do sinal ensaiado [34].

O passo final é a apresentação de uma tela, conforme mostrado na figura II.38, com a definição das formas de onda conseqüentes do processo de filtragem do sinal, consistindo de histogramas das distribuições estatísticas, das autocorrelações e do espectro de energia relativo aos resíduos extraídos do sinal original. [36].

Como o objetivo do trabalho é a caracterização do escoamento bifásico através da manipulação dos valores dos resíduos obtidos pela interferência do **SUS** com o escoamento ascendente das bolhas, todo o processamento de sinal será concentrado na curva de espectro de energia dos resíduos.

Na janela **FFT-Spectrum** escolhe-se o ponto de maior amplitude na forma de onda apresentada e encontra-se a curva de espectro de energia dos resíduos, através da manipulação dos botões relativos aos eixos coordenados, existentes na parte de baixo da caixa da **Interface Gráfica**, com abertura de janelas para definição dos pontos de máxima amplitude de resíduos.

Os valores de máxima amplitude obtidos pelas diversas famílias utilizadas servirão para a elaboração de tabelas, que interrelacionarão valores de vazões, diâmetros de obturadores, máximas amplitudes e frequências locais dos sinais residuais. Convém lembrar que o presente trabalho não apresentará abordagem estatística em função das variáveis aleatórias envolvidas, mas registrará as curvas de ocorrências de pontos de máxima amplitude de componentes agregados ao sinal de aquisição, que por denoising, foram filtrados e reaproveitados para a caracterização do processo.

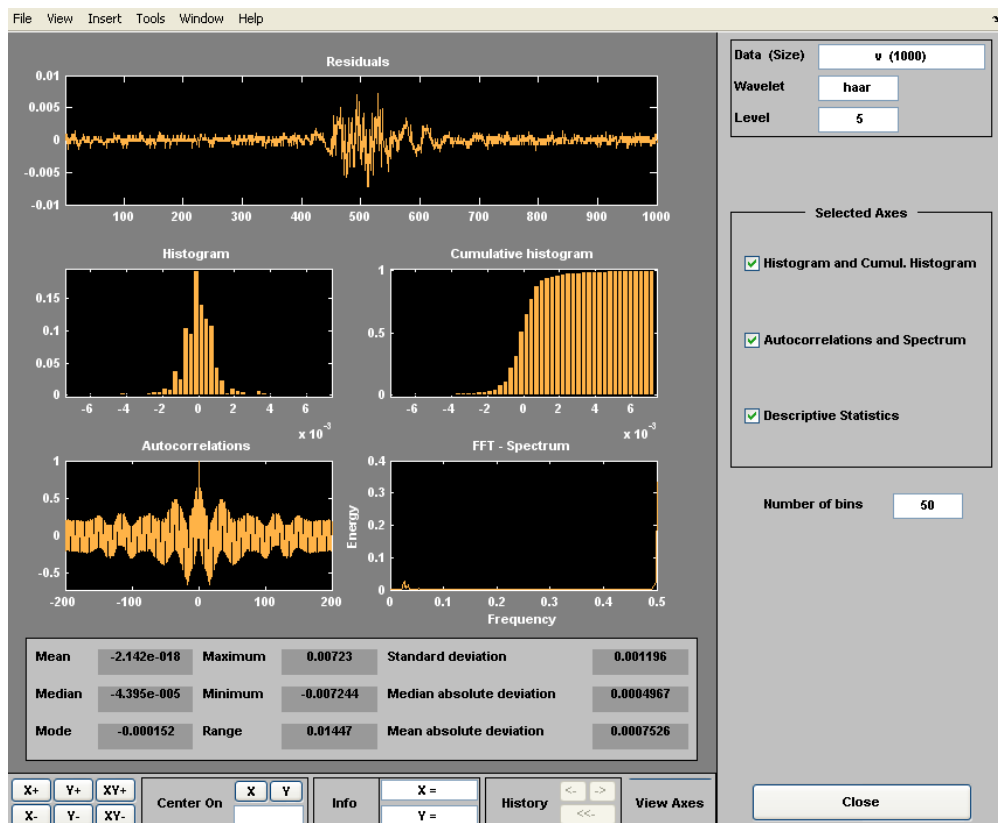


Figura II.38 - Análise estatística dos Resíduos [34].

CAPÍTULO III - RESULTADOS

III.1 - PROCESSAMENTO DOS SINAIS SEM BOLHAS

Os sinais de eco de fundo sem bolhas foram carregados no **Wavelet Toolbox Main Menu**, na caixa de ferramenta correspondente às wavelets de uma dimensão, sendo a seguir executado o procedimento de análise do sinal, usando-se as famílias wavelets escolhidas.

Esta metodologia de execução, que é parte integrante do item II.1, foi estabelecida como passo inicial na análise discreta do sinal sem bolhas, para permitir a visualização das amplitudes de energia dos resíduos de tensão versus pontos amostrados, provocado pela reação da impedância acústica modificada em relação à propagação do ultra-som no meio líquido, a partir da emissão do sinal para ensaio sem a geração de bolhas. [37].

Os valores máximos encontrados para os espectros de energia dos resíduos, podem ser observados na tabela III.1, para cada família wavelet Daubechies, referente à aquisição do sinal de eco de fundo sem geração de bolhas, em função do nível 7 utilizado para análise, sem o envolvimento de vazão e diâmetro, onde pode ser observado as pequenas parcelas de resíduos, se comparados com aqueles do sinais com bolhas.

Tabela III.1 - Sinal sem bolhas.

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	0,012	0,025
Db3 N7	0,015	0,027
Db4 N7	0,016	0,027
Db5 N7	0,009	0,034
Db6 N7	0,015	0,027
Db7 N7	0,016	0,026
Db8 N7	0,008	0,043
Db9 N7	0,015	0,027
Db10 N7	0,013	0,027

III.2 - PROCESSAMENTO DOS SINAIS COM BOLHAS

Após constatar-se que o comportamento do sinal sem bolhas, ao utilizar-se o nível 7 de detalhamento permitia a denoising sem perda do sinal original e a obtenção de resíduos das diversas formas de interferências na simulação do processo, utilizou-se a mesma metodologia para os sinais com bolhas, obtidos com a variação de vazão de insuflamento de ar na coluna de líquido e a variação do diâmetro das saídas desta vazão (obturador).

As tabelas III.2 a III.37 apresentam os valores de amplitudes dos espectros de energia dos resíduos obtidos pela aplicação da análise wavelet da família Daubechies no nível 7, a partir do emprego do software **MatLab**, utilizando-se para tal um valor de diâmetro nominal de obturador e variação dos valores de vazão de ar para produção de bolhas.

Tabela III.2 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,45 mm Fixo Wavelet Db 2 N7.

Código sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 04	0,40	0,45	0,000	0,005
05 - 04	0,50	0,45	0,000	0,005
06 - 04	0,60	0,45	0,000	0,005
07 - 04	0,70	0,45	0,000	0,005
08 - 04	0,80	0,45	18,72	0,022

Tabela III.3 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,55 mm Fixo Wavelet Db2 N7.

Código sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (Volts)	Frequência (MHz)
04 - 05	0,40	0,55	0,000	0,005
05 - 05	0,50	0,55	0,000	0,005
06 - 05	0,60	0,55	0,000	0,005
07 - 05	0,70	0,55	0,000	0,005
08 - 05	0,80	0,55	0,000	0,005

Tabela III.4 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,70 mm Fixo Wavelet Db2 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 07	0,40	0,70	0,000	0,005
05 - 07	0,50	0,70	0,000	0,005
06 - 07	0,60	0,70	0,000	0,005
07 - 07	0,70	0,70	0,000	0,005
08 - 07	0,80	0,70	0,000	0,005

Tabela III.5 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,80 mm Fixo Wavelet Db2 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 08	0,40	0,80	18,790	0,022
05 - 08	0,50	0,80	15,500	0,022
06 - 08	0,60	0,80	12,500	0,023
07 - 08	0,70	0,80	16,750	0,024
08 - 08	0,80	0,80	17,550	0,023

Tabela III.6 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,45 mm Fixo Wavelet Db3 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 04	0,40	0,45	0,000	0,005
05 - 04	0,50	0,45	0,000	0,005
06 - 04	0,60	0,45	0,000	0,005
07 - 04	0,70	0,45	0,000	0,005
08 - 04	0,80	0,45	17,71	0,022

Tabela III.7 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,55 mm Fixo Wavelet Db3 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 05	0,40	0,55	0,000	0,005
05 - 05	0,50	0,55	0,000	0,005
06 - 05	0,60	0,55	0,000	0,005
07 - 05	0,70	0,55	0,000	0,005
08 - 05	0,80	0,55	0,000	0,005

Tabela III.8 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,70 mm Fixo Wavelet Db3 N7.

Código sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 07	0,40	0,70	0,000	0,005
05 - 07	0,50	0,70	0,000	0,005
06 - 07	0,60	0,70	0,000	0,005
07 - 07	0,70	0,70	0,000	0,005
08 - 07	0,80	0,70	0,000	0,005

Tabela III.9 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,80 mm Fixo Wavelet Db3 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 08	0,40	0,80	17,810	0,022
05 - 08	0,50	0,80	13,870	0,022
06 - 08	0,60	0,80	12,940	0,033
07 - 08	0,70	0,80	10,900	0,035
08 - 08	0,80	0,80	11,360	0,023

Tabela III.10 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,45 mm Fixo Wavelet Db4 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 04	0,40	0,45	0,000	0,005
05 - 04	0,50	0,45	0,013	0,066
06 - 04	0,60	0,45	0,000	0,005
07 - 04	0,70	0,45	0,000	0,005
08 - 04	0,80	0,45	16,59	0,034

Tabela III.11 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,55 mm Fixo Wavelet Db4 N7.

Código sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 05	0,40	0,55	0,012	0,067
05 - 05	0,50	0,55	0,007	0,066
06 - 05	0,60	0,55	0,000	0,005
07 - 05	0,70	0,55	0,000	0,066
08 - 05	0,80	0,55	0,000	0,005

Tabela III.12 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,70 mm Fixo Wavelet Db4 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 07	0,40	0,70	0,000	0,005
05 - 07	0,50	0,70	0,000	0,005
06 - 07	0,60	0,70	0,000	0,005
07 - 07	0,70	0,70	0,000	0,005
08 - 07	0,80	0,70	0,000	0,005

Tabela III.13 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,80 mm Fixo Wavelet Db4 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 08	0,40	0,80	16,590	0,034
05 - 08	0,50	0,80	13,650	0,035
06 - 08	0,60	0,80	14,890	0,033
07 - 08	0,70	0,80	12,880	0,028
08 - 08	0,80	0,80	13,730	0,035

Tabela III.14 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,45 mm Fixo Wavelet Db5 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 04	0,40	0,45	0,000	0,005
05 - 04	0,50	0,45	0,029	0,066
06 - 04	0,60	0,45	0,061	0,015
07 - 04	0,70	0,45	0,010	0,065
08 - 04	0,80	0,45	16,12	0,022

Tabela III.15 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,55 mm Fixo Wavelet Db5 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 05	0,40	0,55	0,025	0,005
05 - 05	0,50	0,55	0,091	0,067
06 - 05	0,60	0,55	0,013	0,066
07 - 05	0,70	0,55	0,027	0,066
08 - 05	0,80	0,55	0,001	0,066

Tabela III.16 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,70 mm Fixo Wavelet Db5 N7.

Código sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 07	0,40	0,70	0,000	0,040
05 - 07	0,50	0,70	0,000	0,005
06 - 07	0,60	0,70	0,000	0,017
07 - 07	0,70	0,70	0,002	0,017
08 - 07	0,80	0,70	0,002	0,058

Tabela III.17 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,80 mm Fixo Wavelet Db5 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 08	0,40	0,80	16,230	0,022
05 - 08	0,50	0,80	14,760	0,039
06 - 08	0,60	0,80	10,800	0,007
07 - 08	0,70	0,80	9,265	0,025
08 - 08	0,80	0,80	14,300	0,034

Tabela III.18 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,45 mm Fixo Wavelet Db6 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 04	0,40	0,45	0,007	0,067
05 - 04	0,50	0,45	0,196	0,066
06 - 04	0,60	0,45	0,011	0,037
07 - 04	0,70	0,45	0,185	0,066
08 - 04	0,80	0,45	15,89	0,024

Tabela III.19 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,55 mm Fixo Wavelet Db6 N7.

Código sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 05	0,40	0,55	0,108	0,067
05 - 05	0,50	0,55	0,102	0,007
06 - 05	0,60	0,55	0,094	0,066
07 - 05	0,70	0,55	0,103	0,066
08 - 05	0,80	0,55	0,004	0,066

Tabela III.20 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,70 mm Fixo Wavelet Db6 N7.

Código sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 07	0,40	0,70	0,001	0,124
05 - 07	0,50	0,70	0,001	0,070
06 - 07	0,60	0,70	0,002	0,005
07 - 07	0,70	0,70	0,003	0,005
08 - 07	0,80	0,70	0,026	0,016

Tabela III.21 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,80 mm Fixo Wavelet Db6 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 08	0,40	0,80	15,990	0,023
05 - 08	0,50	0,80	16,150	0,023
06 - 08	0,60	0,80	15,020	0,033
07 - 08	0,70	0,80	10,090	0,034
08 - 08	0,80	0,80	11,420	0,036

Tabela III.22 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,45 mm Fixo Wavelet Db7 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 04	0,40	0,45	0,047	0,067
05 - 04	0,50	0,45	0,083	0,066
06 - 04	0,60	0,45	0,047	0,037
07 - 04	0,70	0,45	0,115	0,066
08 - 04	0,80	0,45	15,79	0,034

Tabela III.23 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,55 mm Fixo Wavelet Db7 N7.

Código sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 05	0,40	0,55	0,048	0,067
05 - 05	0,50	0,55	0,038	0,066
06 - 05	0,60	0,55	0,043	0,066
07 - 05	0,70	0,55	0,064	0,066
08 - 05	0,80	0,55	0,014	0,066

Tabela III.24 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,70 mm Fixo Wavelet Db7 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 07	0,40	0,70	0,005	0,040
05 - 07	0,50	0,70	0,005	0,039
06 - 07	0,60	0,70	0,005	0,027
07 - 07	0,70	0,70	0,010	0,068
08 - 07	0,80	0,70	0,007	0,054

Tabela III.25 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,80 mm Fixo Wavelet Db7 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 08	0,40	0,80	15,900	0,033
05 - 08	0,50	0,80	16,810	0,031
06 - 08	0,60	0,80	18,880	0,033
07 - 08	0,70	0,80	15,110	0,028
08 - 08	0,80	0,80	15,980	0,024

Tabela III.26 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,45 mm Fixo Wavelet Db8 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 04	0,40	0,45	0,051	0,067
05 - 04	0,50	0,45	0,261	0,066
06 - 04	0,60	0,45	0,214	0,037
07 - 04	0,70	0,45	0,260	0,060
08 - 04	0,80	0,45	10,67	0,030

Tabela III.27 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,55 mm Fixo Wavelet Db8 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 05	0,40	0,55	0,183	0,067
05 - 05	0,50	0,55	0,139	0,066
06 - 05	0,60	0,55	0,167	0,005
07 - 05	0,70	0,55	0,264	0,066
08 - 05	0,80	0,55	0,080	0,066

Tabela III.28 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,70 mm Fixo Wavelet Db8 N7.

Código sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 07	0,40	0,70	0,006	0,006
05 - 07	0,50	0,70	0,006	0,078
06 - 07	0,60	0,70	0,012	0,017
07 - 07	0,70	0,70	0,029	0,016
08 - 07	0,80	0,70	0,037	0,005

Tabela III.29 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,80 mm Fixo Wavelet Db8 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 08	0,40	0,80	10,800	0,030
05 - 08	0,50	0,80	14,070	0,037
06 - 08	0,60	0,80	12,520	0,034
07 - 08	0,70	0,80	16,630	0,035
08 - 08	0,80	0,80	15,050	0,029

Tabela III.30 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,45 mm Fixo Wavelet Db9 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 04	0,40	0,45	0,151	0,065
05 - 04	0,50	0,45	0,327	0,066
06 - 04	0,60	0,45	0,399	0,037
07 - 04	0,70	0,45	0,443	0,065
08 - 04	0,80	0,45	19,86	0,034

Tabela III.31 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,55 mm Fixo Wavelet Db9 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 05	0,40	0,55	0,332	0,005
05 - 05	0,50	0,55	0,250	0,066
06 - 05	0,60	0,55	0,269	0,066
07 - 05	0,70	0,55	0,257	0,066
08 - 05	0,80	0,55	0,161	0,066

Tabela III.32 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,70 mm Fixo Wavelet Db9 N7.

Código sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 07	0,40	0,70	0,021	0,029
05 - 07	0,50	0,70	0,015	0,068
06 - 07	0,60	0,70	0,032	0,016
07 - 07	0,70	0,70	0,091	0,009
08 - 07	0,80	0,70	0,067	0,016

Tabela III.33 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,80 mm Fixo Wavelet Db9 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 08	0,40	0,80	20,060	0,034
05 - 08	0,50	0,80	14,110	0,035
06 - 08	0,60	0,80	14,840	0,033
07 - 08	0,70	0,80	9,873	0,033
08 - 08	0,80	0,80	18,200	0,036

Tabela III.34 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,45 mm Fixo Wavelet Db10 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 04	0,40	0,45	0,162	0,067
05 - 04	0,50	0,45	0,145	0,066
06 - 04	0,60	0,45	0,187	0,066
07 - 04	0,70	0,45	0,260	0,008
08 - 04	0,80	0,45	13,28	0,034

Tabela III.35 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,55 mm Fixo Wavelet Db10 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 05	0,40	0,55	0,134	0,067
05 - 05	0,50	0,55	0,191	0,008
06 - 05	0,60	0,55	0,080	0,064
07 - 05	0,70	0,55	0,201	0,066
08 - 05	0,80	0,55	0,043	0,066

Tabela III.36 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,70 mm Fixo Wavelet Db10 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 07	0,40	0,70	0,020	0,036
05 - 07	0,50	0,70	0,017	0,061
06 - 07	0,60	0,70	0,036	0,005
07 - 07	0,70	0,70	0,019	0,005
08 - 07	0,80	0,70	0,026	0,016

Tabela III.37 - Variação de Vazão x Diâmetro 0,80 mm Fixo Wavelet Db10 N7.

Código Sinal	Vazão (l/min)	Obturador (mm)	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
04 - 08	0,40	0,80	13,500	0,034
05 - 08	0,50	0,80	14,110	0,027
06 - 08	0,60	0,80	16,410	0,032
07 - 08	0,70	0,80	19,010	0,038
08 - 08	0,80	0,80	13,550	0,034

III.3 - ANÁLISE DOS SINAIS SEM BOLHAS

O sinal sem bolhas foi simulado de modo a identificar-se a importância da influência de outras fontes de ruídos, advindos direta ou indiretamente da execução da simulação com a geração de bolhas. A análise do sinal de eco de fundo com o mínimo de ruídos inerentes ao processo de caracterização permitiu a identificação dos níveis de filtragem sem perda do sinal de eco de fundo o mais próximo possível do **SUS** emitido.

As diversas considerações gerais a respeito do processamento e análise deste sinal foram executadas em simulações, utilizando todas as famílias Wavelets, de modo a permitir a identificação de quais delas tivessem melhor desempenho e a partir daí, utilizá-las no processamento dos sinais com bolhas, os responsáveis pela caracterização do processo.

A Wavelet de Haar não foi utilizada no processamento de sinal por ser considerada descontínua. As Wavelets de **Daubechies 1** e **Biortogonal 1.1** não foram ensaiadas por serem redundantes à **Wavelet de Haar**.

III.3.1 - Escolha das wavelets de desempenho diferenciado

As Wavelets **Daubechies 10 nível 7**, **Coiflet 5 nível 7**, **Symlet 8 nível 7** e **Biortogonal 6.8 nível 7** foram escolhidas para análise, como aquelas que reunissem características particulares, que as diferenciavam de alguma forma dos aspectos gerais das Wavelets ensaiadas, a partir da análise do sinal sem bolhas. Dentre estas características particulares, destacam-se: as formas de ondas, níveis de filtragem, perda de sinal e demais comportamentos, que demonstrassem um desempenho irregular e que de alguma forma pudesse a vir comprometer todo o trabalho de pesquisa idealizado.

Os diversos sinais de eco de fundo com bolhas foram carregados no **Wavelet Toolbox Main Menu**, sendo a seguir executado o procedimento de discretização de sinal para análise, cujas curvas obtidas foram importantes na composição das tabelas incorporando o resultado dos ensaios.

III.3.2 - Análise das wavelets de melhor desempenho

Os diversos sinais de eco de fundo sem bolhas foram comparados em termos de amplitude de sinal, para escolha das Wavelets de melhor desempenho para execução do processamento dos sinais obtidos através de diversos diâmetros de obturadores.

O termo melhor desempenho refere-se ao fato da análise prévia advinda da aplicação das famílias Wavelets contínuas, a execução do processamento de sinal e observação de quais destas famílias utilizadas proporcionaram a obtenção de resultado final satisfatório, com identificação de resíduos sem perda de parcela do sinal original.

III.4 - ANÁLISE DOS SINAIS COM BOLHAS

A diferença de cotas entre a amplitude do sinal carregado para análise e a amplitude da aproximação do sinal analisado, permite revelar a real importância da execução da filtragem dos ruídos. A diferença encontrada corresponde às parcelas de ruídos extraídos do sinal ensaiado.

A simulação total incluindo toda a quantidade de famílias Wavelets disponíveis e os níveis correspondentes de discretização dos sinais tiveram influência decisiva na adoção de uma metodologia mais coerente, tanto para a economia de passos de simulação quanto para proceder à escolha do tipo de Wavelet mais compatível com o objetivo do trabalho.

As observações efetuadas indicaram que o **nível 7**, correspondente aos níveis de discretização das Wavelets, foi o de melhor desempenho dentre todos, por permitir a realização da filtragem sem perda do sinal original, bem como as Wavelets de níveis superiores.

Os sinais com bolhas utilizando vários diâmetros de obturadores apresentaram perda de amplitude do sinal ultra-sônico, em razão da atenuação do mesmo, em razão das diferenças de impedâncias entre os meios do sistema bifásico.

Os valores foram encontrados definindo-se os pontos de crista dos espectros de energia dos resíduos, após análise, denoising e plotagem das curvas de análise estatística e de espectro de energia.

III.4.1 - Espectros de energia obtidos por análise Wavelet

As Wavelets escolhidas na análise dos sinais sem bolhas foram utilizadas para a obtenção dos diversos espectros de energia, dos sinais com bolhas, escolhendo-se o trecho da curva que apresentasse um ponto de maior inflexão, ou seja, de maior amplitude, para escolha de critério que permitisse ressaltar a influência dos ruídos na caracterização do processo. Em razão da grande quantidade de opções de simulação, estabeleceu-se que os valores de máximas amplitudes da energia dos resíduos seriam considerados os de maior relevância na influência dos mesmos no comportamento do sinal de eco de fundo, de modo a viabilizar uma análise mais consistente no alcance do objetivo de caracterização dos escoamentos bifásicos por influência dos ruídos inerentes ao processo.

III.4.2 - Valores de espectros de energia por Wavelet de Daubechies

Estes valores estão correlacionados aos diversos sinais ensaiados, a partir da manutenção do diâmetro e variação da vazão e manutenção da vazão e variação do diâmetro, sendo estes valores posteriormente utilizados para a escolha dos maiores valores de amplitudes, que serão aplicados na construção dos gráficos na seqüência do processo de análise, conforme estabelecido nas tabelas III.38 a III.57.

Tabela III.38 - Sinal 04 - 04.

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	0,000	0,005
Db3 N7	0,000	0,005
Db4 N7	0,000	0,005
Db5 N7	0,000	0,005
Db6 N7	0,007	0,067
Db7 N7	0,047	0,067
Db8 N7	0,051	0,067
Db9 N7	0,151	0,065
Db10 N7	0,162	0,067

Tabela III.39 - Sinal 05 - 04.

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	0,000	0,005
Db3 N7	0,000	0,005
Db4 N7	0,013	0,066
Db5 N7	0,029	0,066
Db6 N7	0,196	0,066
Db7 N7	0,083	0,066
Db8 N7	0,261	0,066
Db9 N7	0,327	0,066
Db10 N7	0,145	0,066

Tabela III.40 - Sinal 06 - 04.

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	0,000	0,005
Db3 N7	0,000	0,005
Db4 N7	0,000	0,005
Db5 N7	0,061	0,015
Db6 N7	0,011	0,037
Db7 N7	0,047	0,037
Db8 N7	0,214	0,037
Db9 N7	0,399	0,037
Db10 N7	0,187	0,066

Tabela III.41 - Sinal 07 - 04

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	0,000	0,005
Db3 N7	0,000	0,005
Db4 N7	0,000	0,005
Db5 N7	0,010	0,065
Db6 N7	0,185	0,066
Db7 N7	0,115	0,066
Db8 N7	0,260	0,060
Db9 N7	0,443	0,065
Db10 N7	0,260	0,008

Tabela III.42 - Sinal 08 - 04

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	18,72	0,022
Db3 N7	17,71	0,022
Db4 N7	16,59	0,034
Db5 N7	16,12	0,022
Db6 N7	15,89	0,024
Db7 N7	15,79	0,034
Db8 N7	10,67	0,030
Db9 N7	19,86	0,034
Db10 N7	13,28	0,034

Tabela III.43 - Sinal 04 - 05

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	0,000	0,005
Db3 N7	0,000	0,005
Db4 N7	0,012	0,067
Db5 N7	0,025	0,005
Db6 N7	0,108	0,067
Db7 N7	0,048	0,067
Db8 N7	0,183	0,067
Db9 N7	0,332	0,005
Db10 N7	0,134	0,067

Tabela III.44 - Sinal 05 - 05

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	0,000	0,005
Db3 N7	0,000	0,005
Db4 N7	0,007	0,066
Db5 N7	0,091	0,067
Db6 N7	0,102	0,007
Db7 N7	0,038	0,066
Db8 N7	0,139	0,066
Db9 N7	0,250	0,066
Db10 N7	0,191	0,008

Tabela III.45 - Sinal 06 - 05

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	0,000	0,005
Db3 N7	0,000	0,005
Db4 N7	0,006	0,005
Db5 N7	0,013	0,066
Db6 N7	0,094	0,066
Db7 N7	0,043	0,066
Db8 N7	0,167	0,005
Db9 N7	0,269	0,066
Db10 N7	0,080	0,064

Tabela III.46 - Sinal 07 - 05

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	0,000	0,005
Db3 N7	0,000	0,005
Db4 N7	0,000	0,066
Db5 N7	0,027	0,066
Db6 N7	0,103	0,066
Db7 N7	0,064	0,066
Db8 N7	0,264	0,066
Db9 N7	0,257	0,066
Db10 N7	0,201	0,066

Tabela III.47 - Sinal 08 - 05

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	0,000	0,005
Db3 N7	0,000	0,005
Db4 N7	0,000	0,005
Db5 N7	0,001	0,066
Db6 N7	0,004	0,066
Db7 N7	0,014	0,066
Db8 N7	0,080	0,066
Db9 N7	0,161	0,066
Db10 N7	0,043	0,066

Tabela III.48 - Sinal 04 - 07

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	0,000	0,005
Db3 N7	0,000	0,005
Db4 N7	0,000	0,005
Db5 N7	0,000	0,040
Db6 N7	0,001	0,124
Db7 N7	0,005	0,040
Db8 N7	0,006	0,006
Db9 N7	0,021	0,029
Db10 N7	0,020	0,036

Tabela III.49 - Sinal 05 - 07

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	0,000	0,005
Db3 N7	0,000	0,005
Db4 N7	0,000	0,005
Db5 N7	0,000	0,005
Db6 N7	0,001	0,070
Db7 N7	0,005	0,039
Db8 N7	0,006	0,078
Db9 N7	0,015	0,068
Db10 N7	0,017	0,061

Tabela III.50 - Sinal 06 - 07

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	0,000	0,005
Db3 N7	0,000	0,005
Db4 N7	0,000	0,005
Db5 N7	0,000	0,017
Db6 N7	0,002	0,005
Db7 N7	0,005	0,027
Db8 N7	0,012	0,017
Db9 N7	0,032	0,016
Db10 N7	0,036	0,005

Tabela III.51 - Sinal 07 - 07

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	0,000	0,005
Db3 N7	0,000	0,005
Db4 N7	0,000	0,005
Db5 N7	0,002	0,017
Db6 N7	0,003	0,005
Db7 N7	0,010	0,068
Db8 N7	0,029	0,016
Db9 N7	0,091	0,009
Db10 N7	0,019	0,005

Tabela III.52 - Sinal 08 - 07

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	0,000	0,005
Db3 N7	0,000	0,005
Db4 N7	0,000	0,005
Db5 N7	0,002	0,058
Db6 N7	0,026	0,016
Db7 N7	0,007	0,054
Db8 N7	0,037	0,005
Db9 N7	0,067	0,016
Db10 N7	0,026	0,016

Tabela III.53 - Sinal 04 - 08

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	18,790	0,022
Db3 N7	17,810	0,022
Db4 N7	16,590	0,034
Db5 N7	16,230	0,022
Db6 N7	15,990	0,023
Db7 N7	15,900	0,033
Db8 N7	10,800	0,030
Db9 N7	20,060	0,034
Db10 N7	13,500	0,034

Tabela III.54 - Sinal 05 - 08

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	15,500	0,022
Db3 N7	13,870	0,022
Db4 N7	13,650	0,035
Db5 N7	14,760	0,039
Db6 N7	16,150	0,023
Db7 N7	16,810	0,031
Db8 N7	14,070	0,037
Db9 N7	14,110	0,035
Db10 N7	14,110	0,027

Tabela III.55 - Sinal 06 - 08

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	12,500	0,023
Db3 N7	12,940	0,033
Db4 N7	14,890	0,033
Db5 N7	10,800	0,007
Db6 N7	15,020	0,033
Db7 N7	18,880	0,033
Db8 N7	12,520	0,034
Db9 N7	14,840	0,033
Db10 N7	16,410	0,032

Tabela III.56 - Sinal 07 - 08

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	16,750	0,024
Db3 N7	10,900	0,035
Db4 N7	12,880	0,028
Db5 N7	9,265	0,025
Db6 N7	10,090	0,034
Db7 N7	15,110	0,028
Db8 N7	16,630	0,035
Db9 N7	9,873	0,033
Db10 N7	19,010	0,038

Tabela III.57 - Sinal 08 - 08

Família Wavelet	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)
Db2 N7	17,550	0,023
Db3 N7	11,360	0,023
Db4 N7	13,730	0,035
Db5 N7	14,300	0,034
Db6 N7	11,420	0,036
Db7 N7	15,980	0,024
Db8 N7	15,050	0,029
Db9 N7	18,200	0,036
Db10 N7	13,550	0,034

III.5 - VARIÁVEIS DE CARACTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTO BIFÁSICO

Na dissertação de CUNHA FILHO[2] foram retirados valores de diversos parâmetros calculados na caracterização de escoamento bifásico, conforme mostrado na tabela III.58. Estes valores serviram de referência para comparação entre os métodos utilizados e validação para a metodologia da pesquisa adotada e a obtenção dos resultados da simulação.

A correlação entre densidade de bolhas e quantidade de bolhas é lógica de acontecer, pois a densidade de bolhas é diretamente proporcional à quantidade de bolhas, ou seja, o cálculo é executado a partir da contagem das bolhas contidas num volume considerado, o qual é identificado através das imagens fotográficas. Entretanto, para o diâmetro de 0,80 mm existe uma discordância entre as tendências dos valores calculados, a partir da alteração da vazão de 0,60 lpm para 0,70 lpm.

A correlação entre as seções transversais esféricas e densidade de bolhas ou quantidade de bolhas, não é identificada no universo dos dados, pois também é verificada uma divergência entre as tendências dos valores com a alteração da vazão de 0,60 lpm para 0,70 lpm.

As divergências observadas acontecem na vazão de 0,70 lpm, tanto para variação de diâmetro com vazão fixa, quanto para variação de vazão com diâmetro fixo.

Tabela III.58 - Caracterização das bolhas em função dos níveis de escoamento [2].

D (mm)	Vazão (L/min)									
	0,40		0,50		0,60		0,70		0,80	
0,45	421	0,741	449	0,718	472	0,719	708	0,743	919	0,762
	2,673	3,299	2,797	3,299	2,776	3,381	2,647	3,273	2,571	3,228
	1,05		1,12		1,17		1,76		2,28	
	2362,2		2758,2		2856,7		3896,1		4771,0	
0,55	474	0,722	457	0,698	539	0,699	551	0,731	613	0,765
	2,860	3,484	2,823	3,395	2,909	3,494	3,018	3,702	3,060	3,854
	1,18		1,13		1,34		1,37		1,52	
	3045,1		2860,4		3582,3		3941,7		4508,1	
0,70	164	0,677	202	0,716	237	0,712	245	0,716	369	0,723
	4,065	4,845	3,927	4,803	3,863	4,677	3,863	4,628	3,445	4,198
	0,41		0,50		0,59		0,61		0,92	
	2128,4		2446,6		2777,7		2810,8		3439,5	
0,80	145	0,681	225	0,671	190	0,668	183	0,677	202	0,697
	4,320	5,125	3,871	4,675	4,159	4,927	4,348	5,180	4,191	5,027
	0,36		0,56		0,47		0,45		0,50	
	2125,3		2648,0		2581,2		2717,2		2786,6	

Na figura III.1 está estabelecida a disposição dos dados contidos na tabela III.58, que tem por objetivo resumir os principais resultados dos ensaios e simulações efetuadas, de forma a proporcionar a obtenção dos parâmetros para a conclusão da pesquisa e comparações necessárias.

Nº de bolhas	Relação d/d_1
Diâmetro médio esférico (mm)	Diâmetro médio elíptico (mm)
Densidade de bolhas (bolhas/cm ²)	
Área total da seção transversal esférica da bolha (mm ²)	

Figura III.1 - Quadro resumo da caracterização de escoamento bifásico [2].

CAPÍTULO IV - DISCUSSÃO

IV.1 - A RELAÇÃO SINAL x RUÍDO

A aplicação da **Transformada Wavelet** na análise e processamento dos sinais obtidos por técnicas ultra-sônicas, requereu a adoção de uma metodologia para execução de investigação para obtenção de uma ou mais famílias Wavelets, que pudessem melhor representar o espectro de energia dos resíduos referentes ao sinal de eco de fundo.

Procedimentos posteriores permitiram a identificação da localização e composição do sinal, execução da filtragem de ruídos e interferências provenientes dos elementos componentes da instalação, tais como: ruídos de baixa frequência gerados pela fonte de alimentação, provenientes das conexões elétricas e dos ruídos provocados pelo funcionamento do próprio processo.

As tabelas com os valores obtidos na simulação foram criadas, partir da escolha das wavelets com maiores amplitudes de resíduos dos sinais sem bolhas, sem perda de parcela de sinal de eco de fundo e a aplicação destas wavelets na análise dos sinais com bolhas resultantes em função dos diversos diâmetros para variação dos obturadores.

Para permitir a conclusão adequada do processo de caracterização estão dispostas as curvas referentes aos espectros de energia objeto do trabalho, para possibilitar a identificação das formas de energia dos ruídos conseqüentes das bolhas geradas pelos escoamentos em função das variações dos diversos diâmetros e vazões, de modo a permitir a caracterização de escoamentos em sistemas de refrigeração de reatores nucleares ou equipamentos de processo industrial.

Na prática, as medições executadas apresentam um sinal resultante constituído pelo sinal original e incorporação de ruídos, sendo que a probabilidade de ocorrência entre sinal e ruídos, pode ser vista na figura IV.1, através de um gráfico que estabelece nas suas extremidades os limites das curvas de probabilidades de ocorrência de sinais ou ruídos, além de um intervalo central de concomitância dos mesmos sinais e ruídos.[38].

Os limites das relações de energia de todo sinal medido apresentam um percentual de sinal puro e um percentual de ruídos oriundos de diversas fontes. O objetivo de extração de resíduos para caracterização do processo determina a real influência do escoamento das bolhas no sinal de eco de fundo.

A preocupação em se detectar o nível de filtragem sem perda significativa de parcela do sinal original foi decisivo na adoção da metodologia de execução da simulação. Para definir melhor a estratégia, o sinal sem bolhas permitiu melhor avaliar a característica do sinal sem as interferências já mencionadas, pois a probabilidade de manutenção do sinal original torna-se maior, tendo-se somente ruídos da geração e propagação da onda.

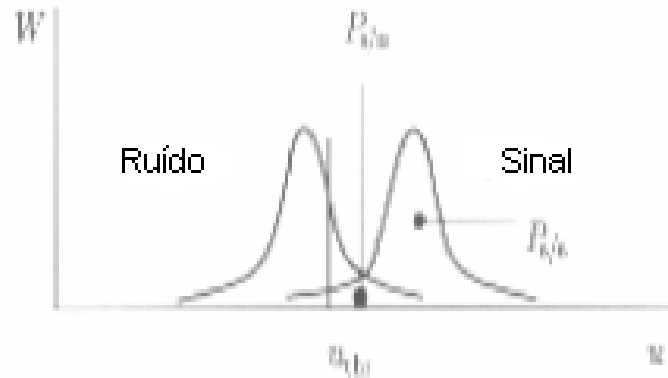


Figura IV.1 - Probabilidade sinal / ruído [38].

Quando se trabalha com a probabilidade de sinal, se depara com outras duas probabilidades: ser somente o sinal ou o sinal estar misturado com ruídos, conforme mostrado na figura IV.2. Da mesma forma, se a probabilidade for de ruído apresentam-se novamente duas probabilidades: ser somente o ruído ou ruído misturado com sinal. O grande desafio de uma simulação com filtragem de ruídos é o alcance de um patamar ou, em último caso, uma faixa de concomitância de sinal / ruído, a mais estreita possível, para um desempenho considerado satisfatório. O objetivo então é extrair todo e qualquer ruído possível sem afetar o sinal original, possibilitando uma amostragem do processo a mais fiel possível daquela que se pretende caracterizar. A caracterização do escoamento bifásico a partir das interferências provocadas pelas bolhas constitui-se numa difícil tarefa. Entretanto, o processamento inicial a partir dos sinais sem bolhas, tem por consequência a diminuição da probabilidade de erro na degradação do sinal e a otimização da contribuição dos ruídos na caracterização do escoamento, pois neste caso é identificado o melhor nível de filtragem a se adotar. [13,37].

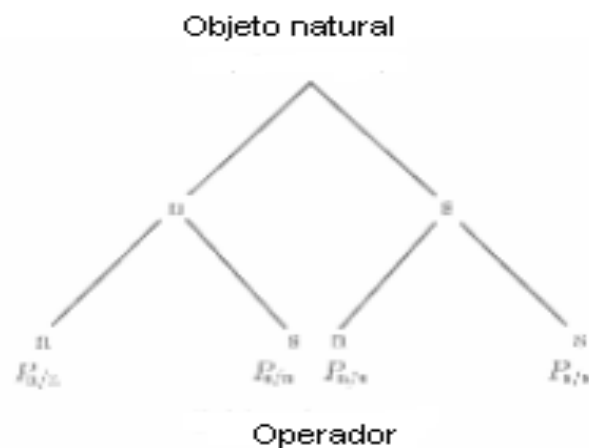


Figura IV.2 - Árvore de decisão sinal / ruído [38].

A exemplificação de alguns tipos de ruídos mais freqüentes pode ser encontrada nas caracterizações dos processos, gerados por diversos motivos e mostrados abaixo:

- baixa freqüência da fonte de alimentação dos equipamentos de medição ou de geração de sinal;
- ondas mecânicas do ultra-som no meio líquido;
- conexões dos cabos de interligação elétrica dos componentes;
- conexões dos cabos de sinal de interligação dos componentes;
- movimento ascendente do escoamento das bolhas;
- cavitação das bolhas, provocando ondas e movimento caótico do escoamento;
- dilatação do meio de propagação, em virtude do aumento de temperatura devido à temperatura ambiente e à cavitação das bolhas.

IV.2 - VALORES MÁXIMOS DE ESPECTROS DE ENERGIA DOS SINAIS

Um resumo dos valores máximos encontrados no item III.4.2, para as amplitudes dos espectros de energia para cada família wavelet, em função do nível 7 utilizado na análise, encontra-se nas tabelas IV.1 a IV.9. Estes valores máximos foram dispostos para cada tipo de sinal, envolvendo vazões x diâmetro fixo ou vazão fixa x diâmetros.

A partir das observações realizadas no modo de variação dos espectros de energia, em função das alternâncias de vazões e diâmetros, acarretarão as ações necessárias para a obtenção dos subsídios, que nortearão as conclusões pertinentes, de modo a possibilitar a caracterização do processo.

Os valores considerados como máximos seguiram uma linha lógica para definição das maiores influências dos ruídos na propagação da onda ultra-sônica, que tem por consequência, um sinal obtido como eco de fundo, incorporando tais ruídos. As influências dos ruídos originários das bolhas e suas amplitudes refletem, então, a caracterização de escoamento identificada com a medição dos espectros de energia dos sinais de eco de fundo.

Os valores de densidade de bolhas referem-se ao procedimento de cálculo efetuado relacionando quantidade de bolhas contadas e o valor da área relativa à seção longitudinal da coluna, ambos em correspondência à análise fotográfica executada.

Tabela IV.1 - Variação de vazão e D=0,45 mm fixo.

Sinais	Amplitude (mV)	Freqüência (MHz)	Densidade Bolhas	Quantidade Bolhas	Seção Esférica
04 - 04	0,162	0,067	1,05	421	2362,2
05 - 04	0,327	0,066	1,12	449	2758,2
06 - 04	0,399	0,037	1,17	472	2856,7
07- 04	0,443	0,065	1,76	708	3896,1
08 - 04	19,860	0,034	2,28	919	4771,0

Os valores de amplitudes dos espectros de energia dos resíduos, conforme tabela IV.1, apresentaram desempenho crescente da vazão de 0,40 lpm à vazão de 0,80 lpm, com a manutenção do diâmetro de 0,45 mm e com a variação dos valores de vazão. Pode-se observar uma alteração brusca da amplitude para o diâmetro de 0,80 mm e outra variação percentual relevante da vazão de 0,40 lpm à vazão de 0,50 lpm.

As freqüências relativas às vazões de 0,40 lpm, 0,50 lpm e 0,70 lpm tiveram valores bem próximos, assim como os menores valores das freqüências referentes às vazões de 0,60 lpm e 0,80 lpm.

Os valores de densidade de bolhas tiveram também um desempenho crescente em relação à variação de vazão para o diâmetro fixo de 0,45 mm. Para as vazões de 0,40 lpm, 0,50 lpm e 0,60 lpm os valores de densidade de bolhas tiveram variações bem próximas.

As quantidades de bolhas também tiveram um desempenho crescente em relação à variação de vazão e a manutenção do diâmetro de 0,45 mm, mostrando uma estreita correspondência com a densidade de bolhas.

Os valores referentes às áreas das seções transversais esféricas das bolhas tiveram desempenho também crescente em relação à variação de vazão, mostrando também uma estreita correlação com a densidade e o número de bolhas.

Os valores das variáveis utilizadas e apresentadas na tabela IV.1 e que serviram de comparação para a caracterização do processo mostraram desempenhos com total compatibilidade.

A figura IV.3 refere-se à plotagem dos dados de amplitude versus vazão, considerando uma escala logarítmica, que apresenta uma melhor visualização em comparação com a figura IV.4 com escala linear.

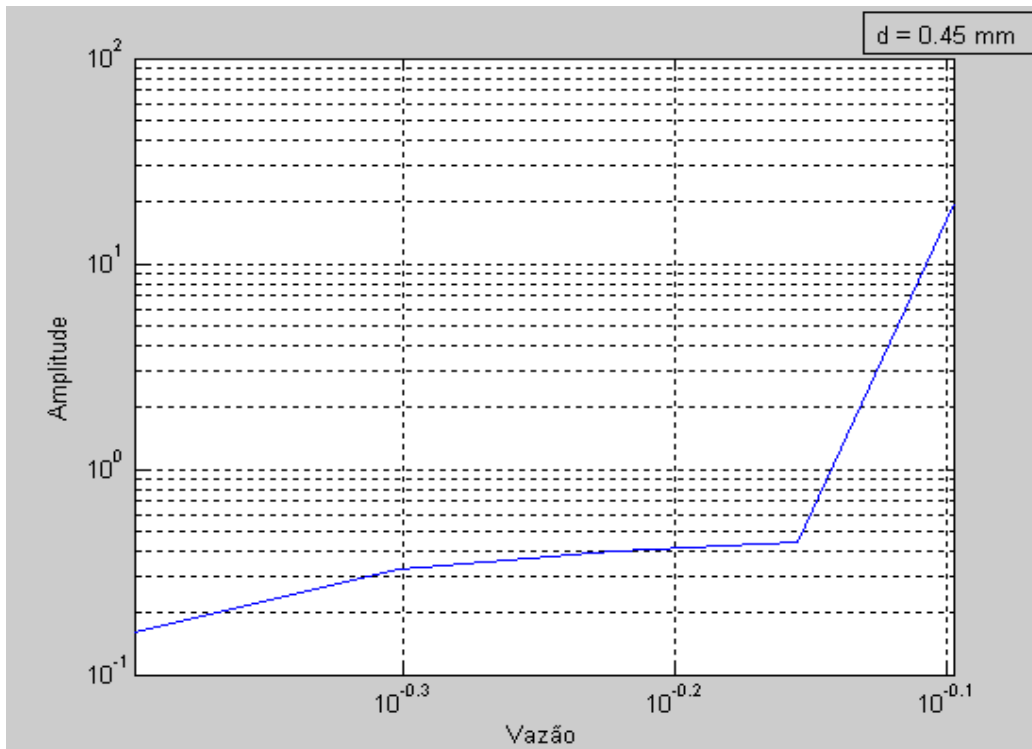


Figura IV.3 - Amplitude x Vazão $D=0,45$ mm.
Escala logarítmica.

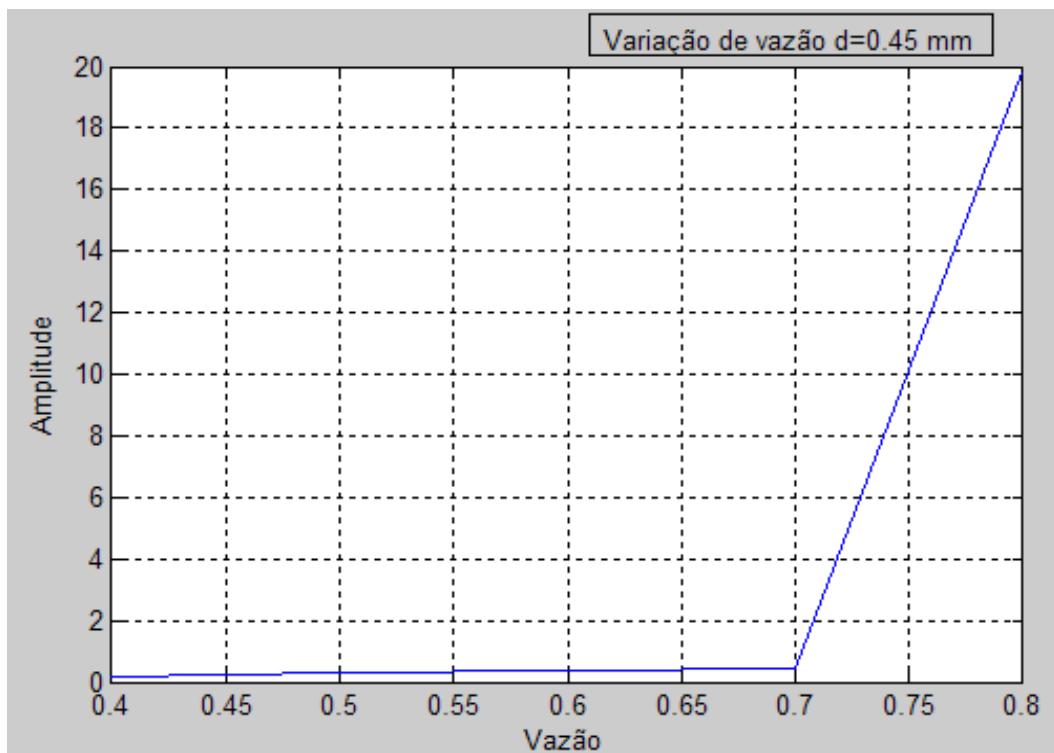


Figura IV.4 - Amplitude x Vazão $D=0,45$ mm.
Escala linear.

Tabela IV.2 - Variação de vazão e D=0,55 mm fixo.

Sinais	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)	Densidade Bolhas	Quantidade Bolhas	Seção Esférica
04 - 05	0,332	0,005	1,18	474	3045,1
05 - 05	0,250	0,066	1,13	457	2860,4
06 - 05	0,269	0,066	1,34	539	3582,3
07 - 05	0,264	0,066	1,37	551	3941,7
08 - 05	0,161	0,066	1,52	613	4508,1

Os valores de amplitudes dos espectros de energia dos resíduos, conforme tabela IV.2, apresentaram desempenho com alternância de valores, com a manutenção do diâmetro de 0,55 mm e com a variação dos valores de vazão. Os valores de amplitudes para as vazões de 0,70 lpm e 0,80 lpm merecem uma análise mais apurada ou mais execuções de simulações no prosseguimento da linha de pesquisa criada, em razão de terem apresentado valores de amplitudes menores, quando comparados com os demais valores, principalmente para o caso do diâmetro 0,80 mm. O valor encontrado para o diâmetro de 0,70 mm em razão da tolerância da medição e aleatoriedade do processo poderia ser considerado maior que o anterior para melhor ajuste no comportamento em relação aos demais parâmetros da tabela.

As frequências relativas às vazões de 0,50 lpm, 0,60 lpm, 0,70 lpm e 0,80 lpm tiveram valores idênticos e um valor bem inferior para a vazão de 0,40 lpm.

Os valores de densidade de bolhas tiveram também um desempenho com alternância de valores em relação à variação de vazão para o diâmetro fixo de 0,55 mm. Para as vazões de 0,40 lpm e 0,50 lpm, além de 0,60 lpm e 0,70 lpm os valores de densidade de bolhas tiveram taxas de variação bem próximas e um valor mais alto para a maior vazão.

As quantidades de bolhas também tiveram um desempenho com alternância de valores em relação à variação de vazão com a manutenção do diâmetro de 0,55 mm.

Os valores referentes às áreas das seções transversais esféricas das bolhas tiveram desempenho também oscilante em relação à variação de vazão.

Os valores das variáveis utilizadas e apresentadas na tabela IV.2 e que serviram de comparação para a caracterização do processo mostraram desempenhos com razoável compatibilidade.

A figura IV.5 refere-se à plotagem dos dados de amplitude versus vazão, considerando uma escala logarítmica, que apresenta uma melhor visualização em comparação com a figura IV.6 com escala linear.

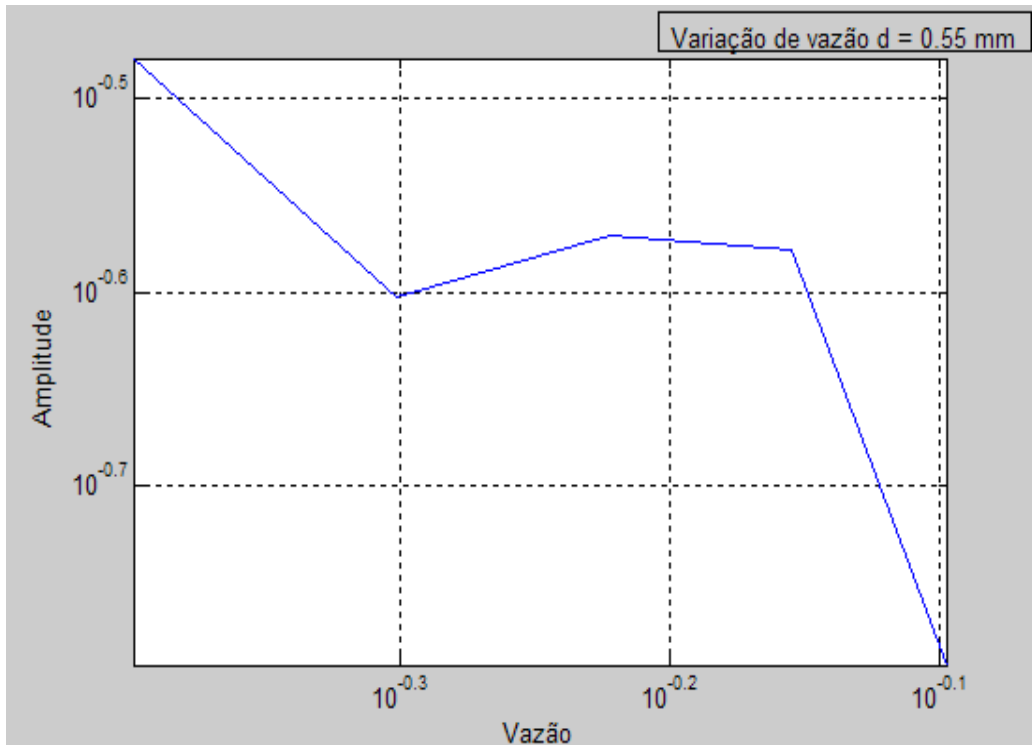


Figura IV.5. - Amplitude x Vazão D=0,55 mm.
Escala logarítmica.

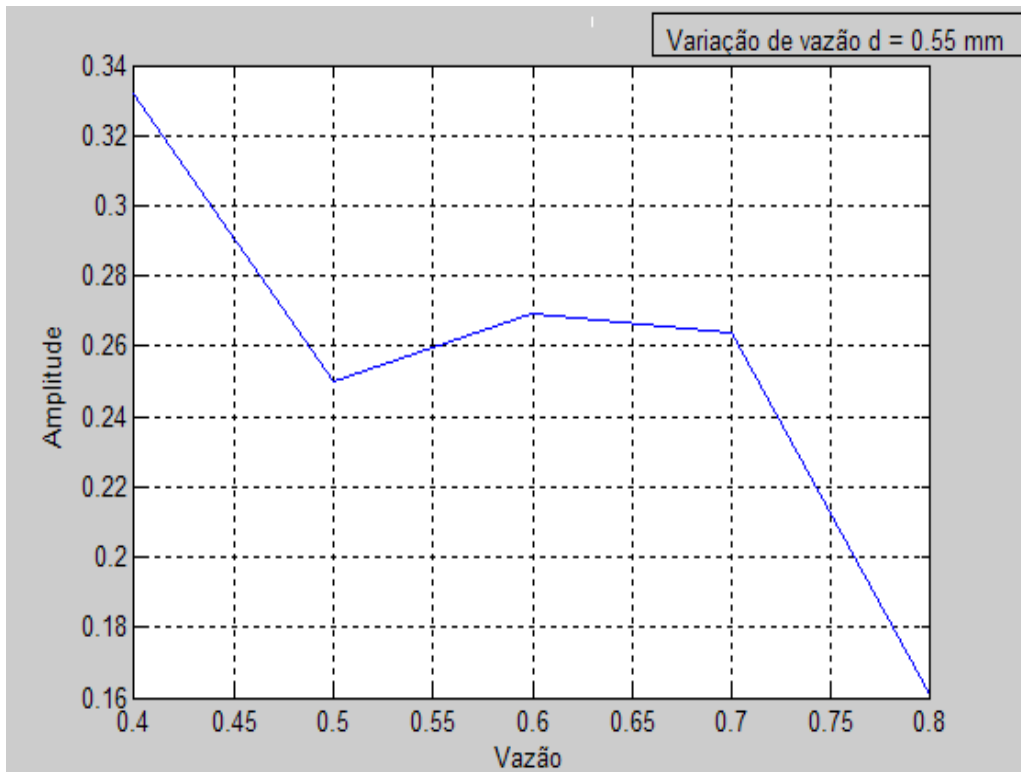


Figura IV.6 - Amplitude x Vazão D=0,55 mm.
Escala linear.

Tabela IV.3 - Variação de vazão e D=0,70 mm fixo.

Sinais	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)	Densidade Bolhas	Quantidade Bolhas	Seção Esférica
04 - 07	0,021	0,029	0,41	164	2128,4
05 - 07	0,017	0,061	0,50	202	2446,6
06 - 07	0,036	0,005	0,59	237	2777,7
07 - 07	0,091	0,009	0,61	245	2810,8
08 - 07	0,067	0,016	0,92	369	3439,5

Os valores de amplitudes dos espectros de energia dos resíduos, conforme tabela IV.3, apresentaram desempenho com alternância de valores com a manutenção do diâmetro de 0,70 mm e com a variação dos valores de vazão. Os valores de amplitudes para as vazões de 0,50 lpm e 0,80 lpm merecem uma análise mais apurada ou mais execuções de simulações, pois divergem da tendência ocorrida para a densidade de bolhas e quantidade de bolhas.

As frequências relativas às vazões de 0,60 lpm e 0,70 lpm tiveram valores bem próximos e valores bem diferentes para as vazões de 0,40 lpm, 0,50 lpm e 0,80 lpm.

Os valores de densidade de bolhas tiveram um desempenho crescente em relação à variação de vazão para o diâmetro fixo de 0,70 mm. Para as vazões de 0,40 lpm e 0,50 lpm, além de 0,60 lpm e 0,70 lpm os valores de densidade de bolhas tiveram taxas de variação bem próximas e um valor mais alto para a maior vazão.

As quantidades de bolhas tiveram um desempenho crescente em relação à variação de vazão com a manutenção do diâmetro de 0,70 mm.

Os valores referentes às áreas das seções transversais esféricas das bolhas tiveram desempenho também crescente em relação à variação de vazão.

Os valores das variáveis utilizadas e apresentadas na tabela IV.3 e que serviram de comparação para a caracterização do processo mostraram desempenhos com razoável compatibilidade.

A figura IV.7 refere-se à plotagem dos dados de amplitude versus vazão, considerando uma escala logarítmica, que apresenta uma melhor visualização em comparação com a figura IV.8 com escala linear.

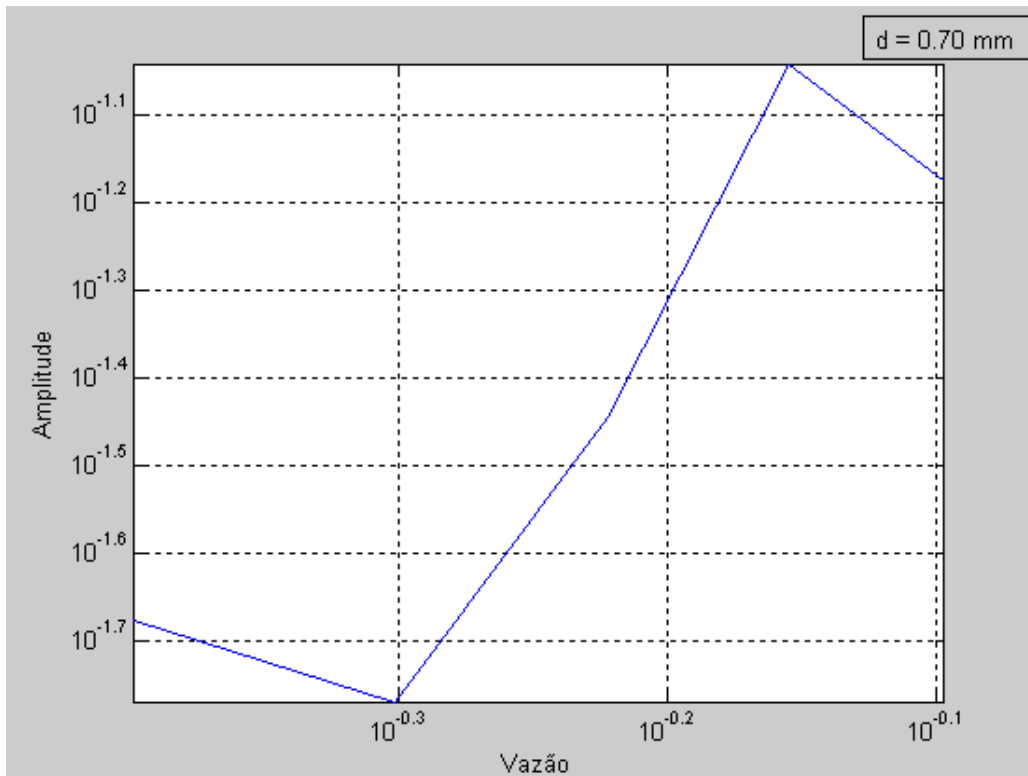


Figura IV.7 - Amplitude x Vazão $D=0,70$ mm.
Escala logarítmica.

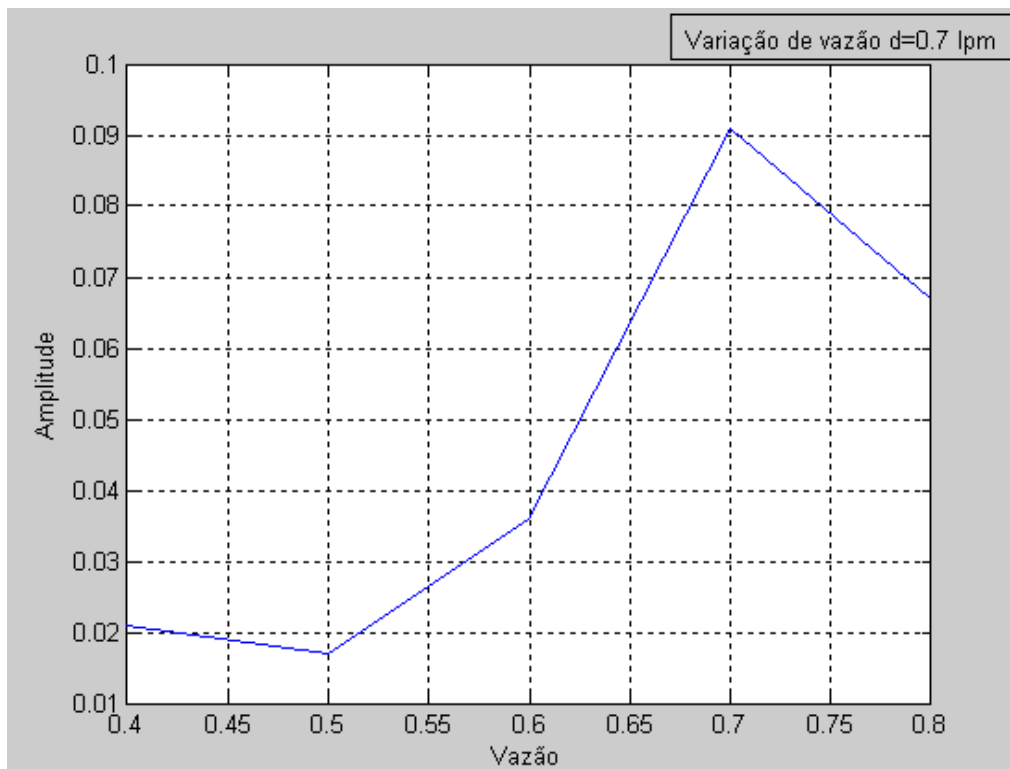


Figura IV.8 - Amplitude x Vazão $D=0,70$ mm.
Escala linear.

Tabela IV.4 - Variação de vazão e D=0,80 mm fixo.

Sinais	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)	Densidade Bolhas	Quantidade Bolhas	Seção Esférica
04 - 08	20,060	0,034	0,36	145	2125,3
05 - 08	16,810	0,031	0,56	225	2648,0
06 - 08	18,880	0,033	0,47	190	2581,2
07 - 08	19,010	0,038	0,45	183	2717,2
08 - 08	18,200	0,036	0,60	202	2786,6

Os valores de amplitudes dos espectros de energia dos resíduos, conforme tabela IV.4, apresentaram desempenho com alternância de valores com a manutenção do diâmetro de 0,80 mm e com a variação dos valores de vazão. Os valores de amplitudes para as vazões de 0,50 lpm e 0,80 lpm merecem uma análise mais apurada ou mais execuções de simulações, em razão da divergência da tendência dos valores comparados com os valores de densidade de bolhas e quantidade de bolhas, muito embora seja mantida uma proximidade entre os valores relativos às vazões de 0,40 lpm e 0,50 lpm, além das vazões 0,70 lpm e 0,80 lpm.

As frequências relativas às vazões de 0,80 lpm e 0,70 lpm, 0,40 lpm e 0,60 lpm tiveram valores bem próximos e um valor inferior para a vazão de 0,50 lpm.

Os valores de densidade de bolhas tiveram um desempenho com alternância de valores em relação à variação de vazão para o diâmetro fixo de 0,80 mm. Para as vazões de 0,80 lpm e 0,50 lpm, além de 0,60 lpm e 0,70 lpm os valores de densidade de bolhas tiveram taxas de variação bem próximas e um valor mais baixo para a menor vazão. Para a vazão de 0,70 lpm o valor apresentou divergência em relação às seções transversais esféricas das bolhas.

As quantidades de bolhas tiveram um desempenho com alternância de valores em relação à variação de vazão com a manutenção do diâmetro de 0,80 mm.

Os valores referentes às áreas das seções transversais esféricas das bolhas tiveram desempenho também com alternância em relação à variação de vazão.

Os valores das variáveis utilizadas e apresentadas na tabela IV.4 e que serviram de comparação para a caracterização do processo mostraram desempenhos com baixa compatibilidade, que merece uma melhor avaliação e execução de mais simulações.

A figura IV.9 refere-se à plotagem dos dados de amplitude versus vazão, considerando uma escala logarítmica, que apresenta uma melhor visualização em comparação com a figura IV.10 com escala linear.

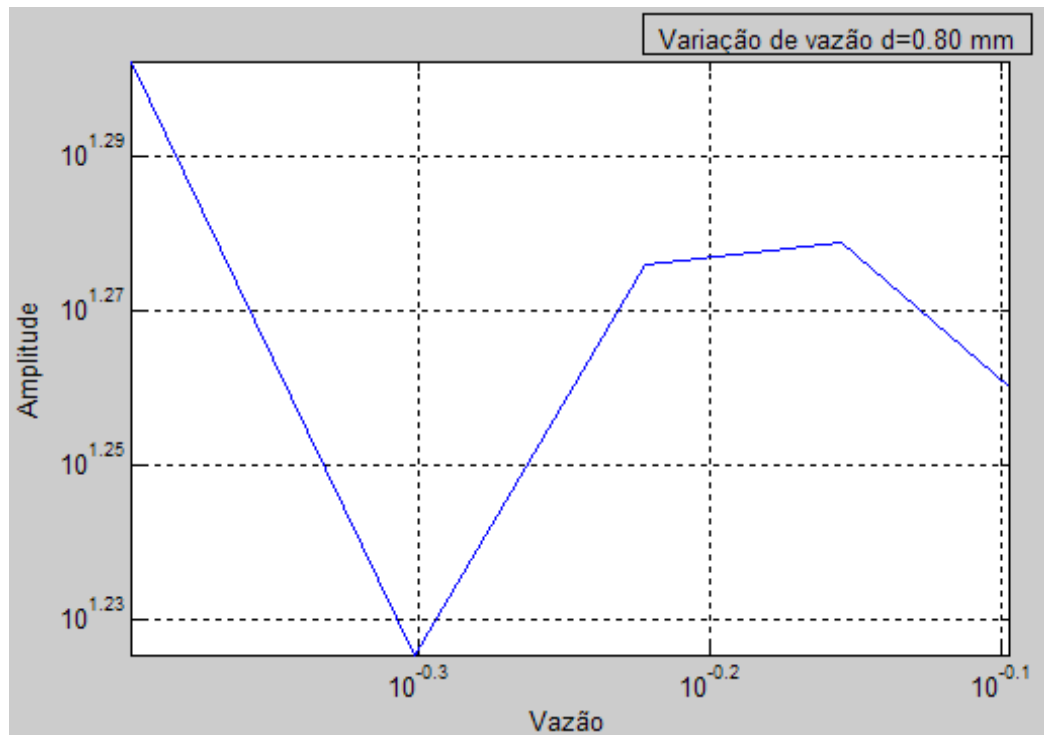


Figura IV.9 - Amplitude x Vazão D=0,80 mm.
Escala logarítmica.

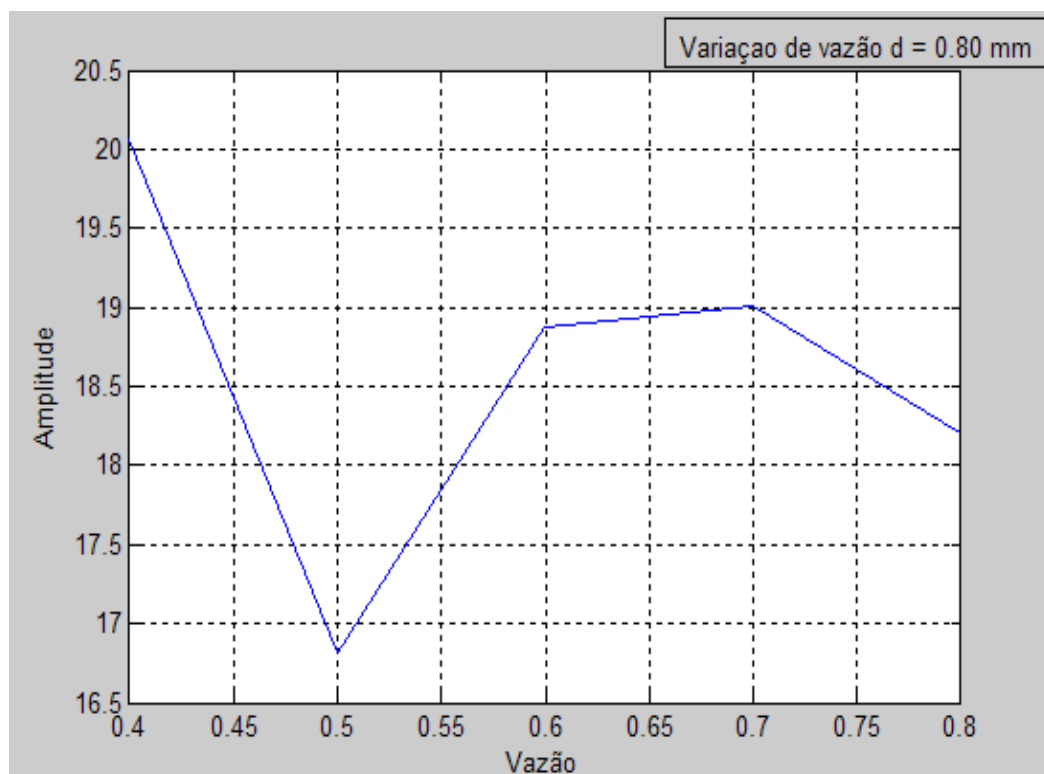


Figura IV.10 - Amplitude x Vazão D=0,80 mm.
Escala linear.

Tabela IV.5 - Variação de diâmetro e $V=0,40$ lpm fixa.

Sinais	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)	Densidade Bolhas	Quantidade Bolhas	Seção Esférica
04 - 04	0,162	0,067	1,05	421	2362,2
04 - 05	0,332	0,005	1,18	474	3045,1
04 - 07	0,021	0,029	0,41	164	2128,4
04 - 08	20,060	0,034	0,36	145	2125,3

Os valores de amplitudes dos espectros de energia dos resíduos, conforme tabela IV.5, apresentaram desempenho com alternância de valores com a manutenção do valor de vazão de 0,40 lpm e com a variação dos valores de diâmetro. Pode-se observar uma alteração brusca da amplitude para o diâmetro de 0,80 mm. Os valores de amplitudes para os diâmetros de 0,70 mm e 0,80 mm merecem uma análise mais apurada ou mais execuções de simulações, mas apresentaram correlação com a tendência dos valores de densidade de bolhas e quantidade de bolhas, principalmente para o diâmetro de 0,80mm.

As frequências relativas aos diâmetros de 0,80 mm e 0,70 mm tiveram valores bem próximos, um valor bem inferior para o diâmetro de 0,55 mm e um valor maior para o diâmetro de 0,45 mm.

Os valores de densidade de bolhas tiveram um desempenho com alternância de valores com a variação de diâmetro para a vazão fixa de 0,40 lpm. Para os diâmetros de 0,80 mm e 0,70 mm, os valores de densidade de bolhas foram bem próximos, mas para os diâmetros de 0,45 mm e 0,55 mm os valores de densidade de bolhas tiveram uma diferença um pouco maior. Em termos gerais o resultado foi satisfatório.

As quantidades de bolhas tiveram um desempenho também com alternância de valores, em relação à variação de diâmetro com a manutenção da vazão de 0,40 lpm.

Os valores referentes às áreas das seções transversais esféricas das bolhas tiveram desempenho também com alternância de valores em relação à variação de diâmetro.

Os valores das variáveis utilizadas e apresentadas na tabela IV.5 e que serviram de comparação para a caracterização do processo mostraram desempenhos com razoável compatibilidade.

A figura IV.11 refere-se à plotagem dos dados de amplitude versus diâmetro, considerando uma escala logarítmica, que apresenta uma melhor visualização em comparação com a figura IV.12 com escala linear.

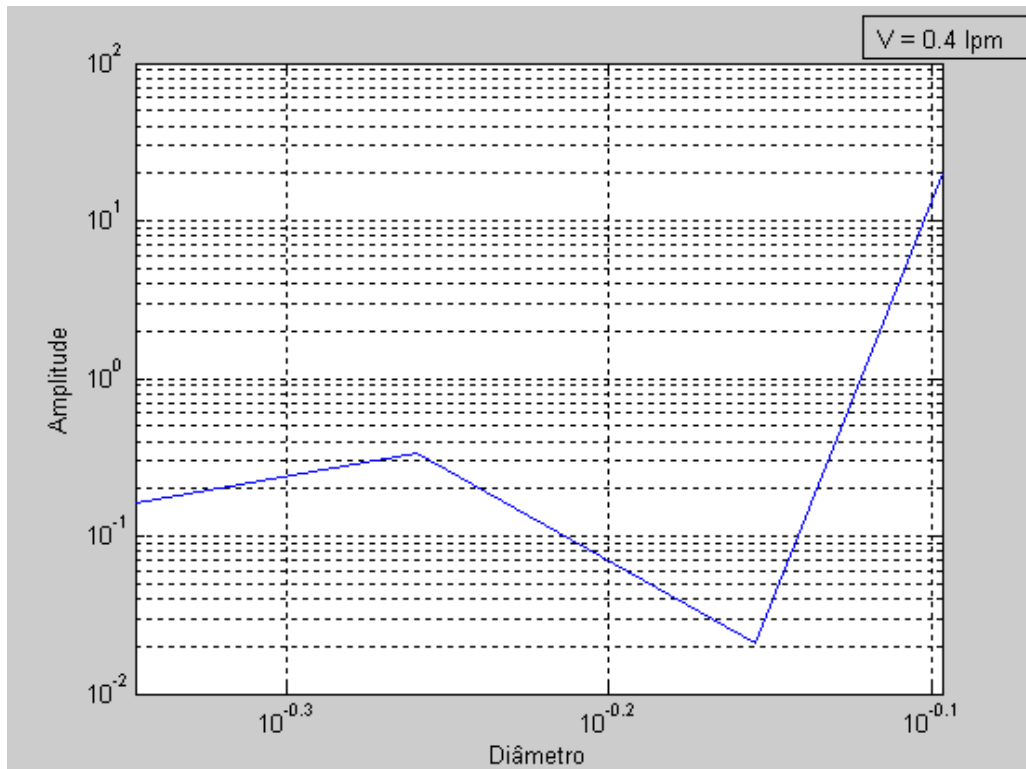


Figura IV.11 - Amplitude x Diâmetro $V=0,40 \text{ lpm}$.
Escala logarítmica.

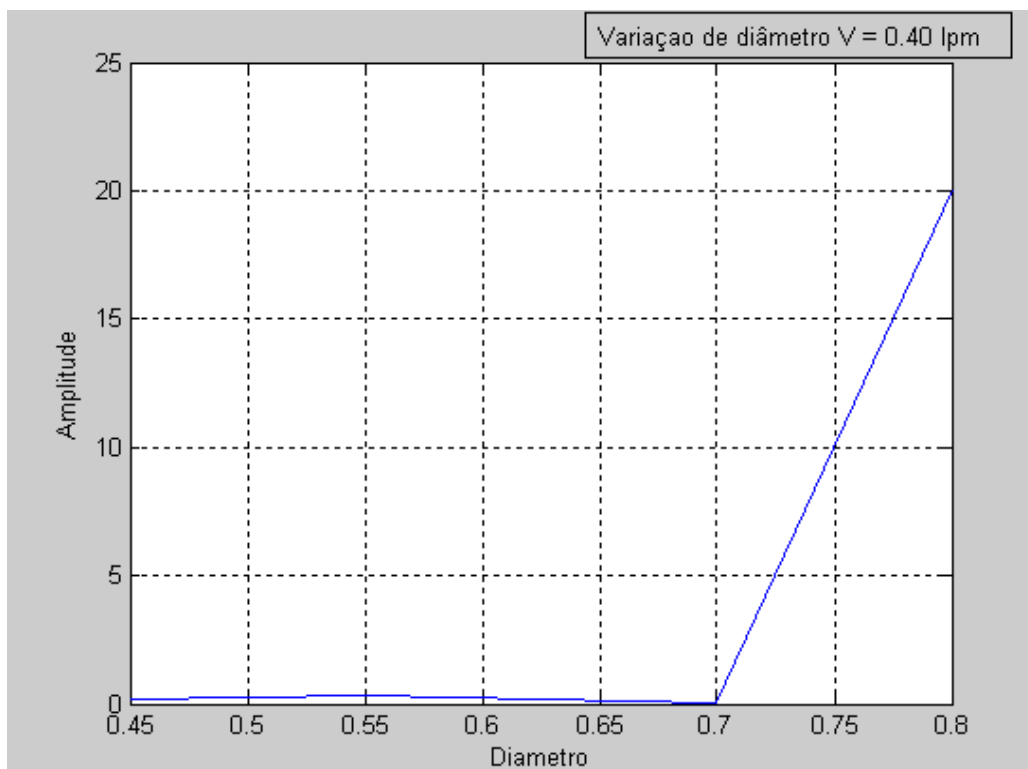


Figura IV.12 - Amplitude x Diâmetro $V=0,40 \text{ lpm}$.
Escala linear.

Tabela IV.6 - Variação de diâmetro e V=0,50 lpm fixa.

Sinais	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)	Densidade Bolhas	Quantidade Bolhas	Seção Esférica
05 - 04	0,327	0,066	1,12	449	2758,2
05 - 05	0,250	0,066	1,18	457	2860,4
05 - 07	0,017	0,061	0,50	202	2446,6
05 - 08	16,810	0,031	0,56	225	2648,0

Os valores de amplitudes dos espectros de energia dos resíduos, conforme tabela IV.6, apresentaram desempenho com alternância de valores com a manutenção da vazão de 0,50 lpm e com a variação dos valores de diâmetros. Pode-se observar uma alteração brusca da amplitude para o diâmetro de 0,80 mm. O valor de amplitude para o diâmetro de 0,45 mm merece uma análise mais apurada ou mais execuções de simulações. Entretanto, de uma forma geral os valores encontrados seguem um comportamento coerente, exceto para o diâmetro de 0,45 mm que divergiu um pouco em relação aos demais parâmetros encontrados.

As frequências relativas aos diâmetros de 0,45 mm e 0,55 mm tiveram valores idênticos, um valor bem próximo para o diâmetro de 0,70 mm e um valor menor para o diâmetro de 0,80 mm.

Os valores de densidade de bolhas tiveram um desempenho também com alternância de valores com a variação de diâmetro para a vazão fixa de 0,50 lpm. Para os diâmetros de 0,80 mm e 0,70 mm, além de 0,45 mm e 0,55 mm, tanto os valores de densidade de bolhas quanto de quantidade de bolhas foram bem próximos.

As quantidades de bolhas tiveram um desempenho com alternância de valores com a variação de diâmetro com a manutenção da vazão de 0,50 lpm.

Os valores referentes às áreas das seções transversais esféricas das bolhas tiveram desempenho também com alternância de valores em relação à variação de diâmetro.

Os valores das variáveis utilizadas e apresentadas na tabela IV.6 e que serviram de comparação para a caracterização do processo mostraram desempenhos com razoável compatibilidade.

A figura IV.13 refere-se à plotagem dos dados de amplitude versus diâmetro, considerando uma escala logarítmica, que apresenta uma melhor visualização em comparação com a figura IV.14 com escala linear.

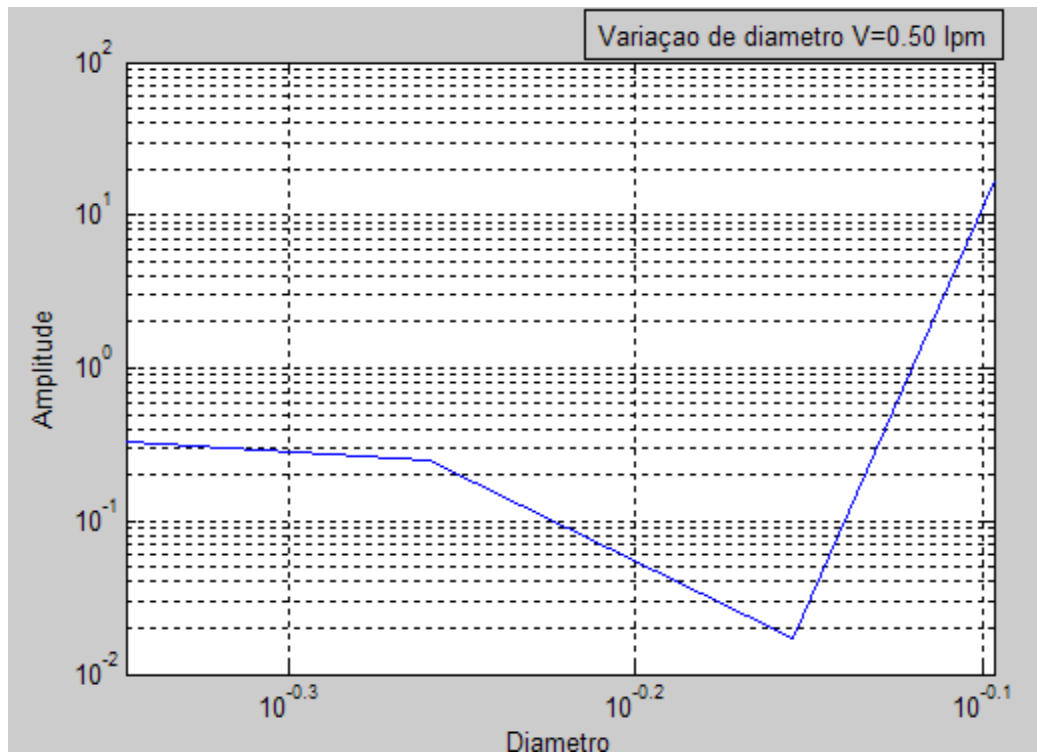


Figura IV.13 - Amplitude x Diâmetro V=0,50 lpm.
Escala logarítmica.

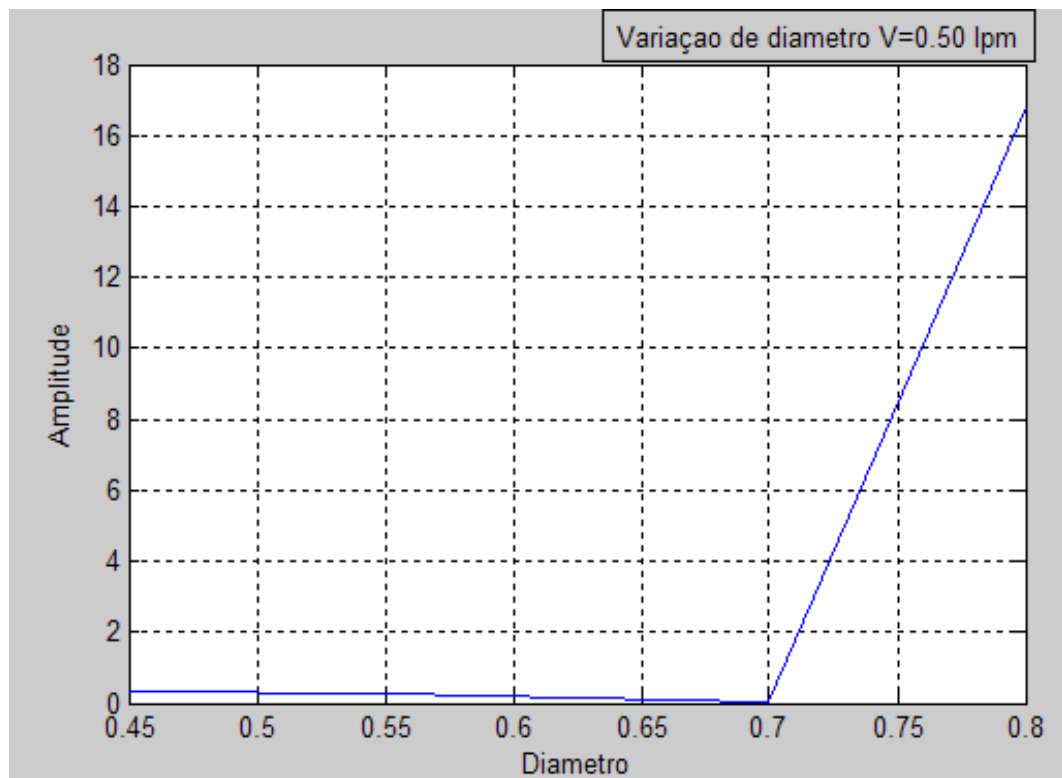


Figura IV.14 - Amplitude x Diâmetro V=0,50 lpm.
Escala linear.

Tabela IV.7 - Variação de diâmetro e V=0,60 lpm fixa.

Sinais	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)	Densidade Bolhas	Quantidade Bolhas	Seção Esférica
06 - 04	0,399	0,037	1,17	472	2856,7
06 - 05	0,269	0,066	1,34	539	3582,3
06 - 07	0,036	0,005	0,39	237	2777,7
06 - 08	18,880	0,033	0,47	190	2581,2

Os valores de amplitudes dos espectros de energia dos resíduos, conforme tabela IV.7, apresentaram desempenho com alternância de valores com a manutenção da vazão de 0,60 lpm e com a variação dos valores de diâmetro. Pode-se observar uma alteração brusca da amplitude para o maior valor de diâmetro. Os valores de amplitudes obtidos para os diâmetros de 0,45 mm e 0,80 mm merecem uma análise mais apurada ou mais execuções de simulações. Entretanto, comparando-se com o comportamento da densidade de bolhas, apenas o diâmetro de 0,45 mm apresentou divergência quanto aos valores encontrados.

As frequências relativas aos diâmetros de 0,45 mm e 0,80 mm tiveram valores bem próximos, um valor mais alto para o diâmetro de 0,55 mm e um valor menor para o diâmetro de 0,70 mm.

Os valores de densidade de bolhas tiveram um desempenho com alternância de valores em relação à variação de diâmetro para a vazão fixa de 0,60 lpm. Para os diâmetros de 0,80 mm e 0,70 mm, os valores de densidade de bolhas foram bem próximos e para os diâmetros de 0,45 mm e 0,55 mm a diferença um pouco maior.

As quantidades de bolhas tiveram um desempenho com alternância de valores em relação à variação de diâmetro com a manutenção da vazão de 0,60 lpm.

Os valores referentes às áreas das seções transversais esféricas das bolhas tiveram desempenho também com alternância de valores em relação à variação de diâmetro.

Os valores das variáveis utilizadas e apresentadas na tabela IV.7 e que serviram de comparação para a caracterização do processo mostraram desempenhos com razoável compatibilidade.

A figura IV.15 refere-se à plotagem dos dados de amplitude versus diâmetro, considerando uma escala logarítmica, que apresenta uma melhor visualização em comparação com a figura IV.16 com escala linear.

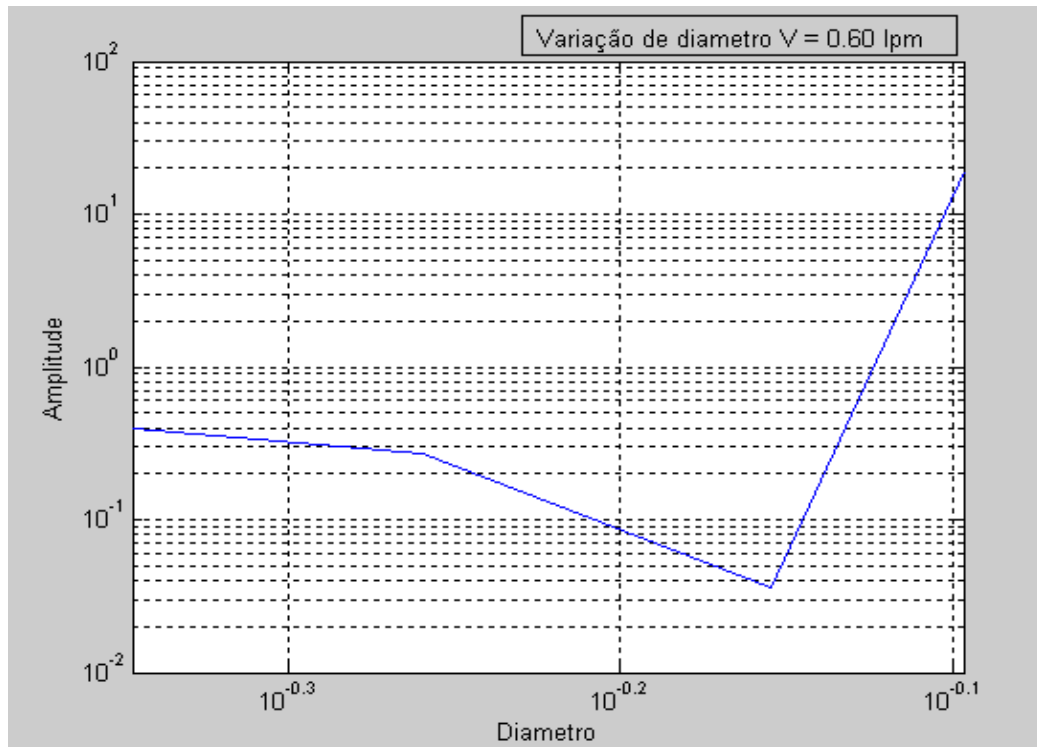


Figura IV.15 - Amplitude x Diâmetro $V=0,60$ lpm.
Escala logarítmica.

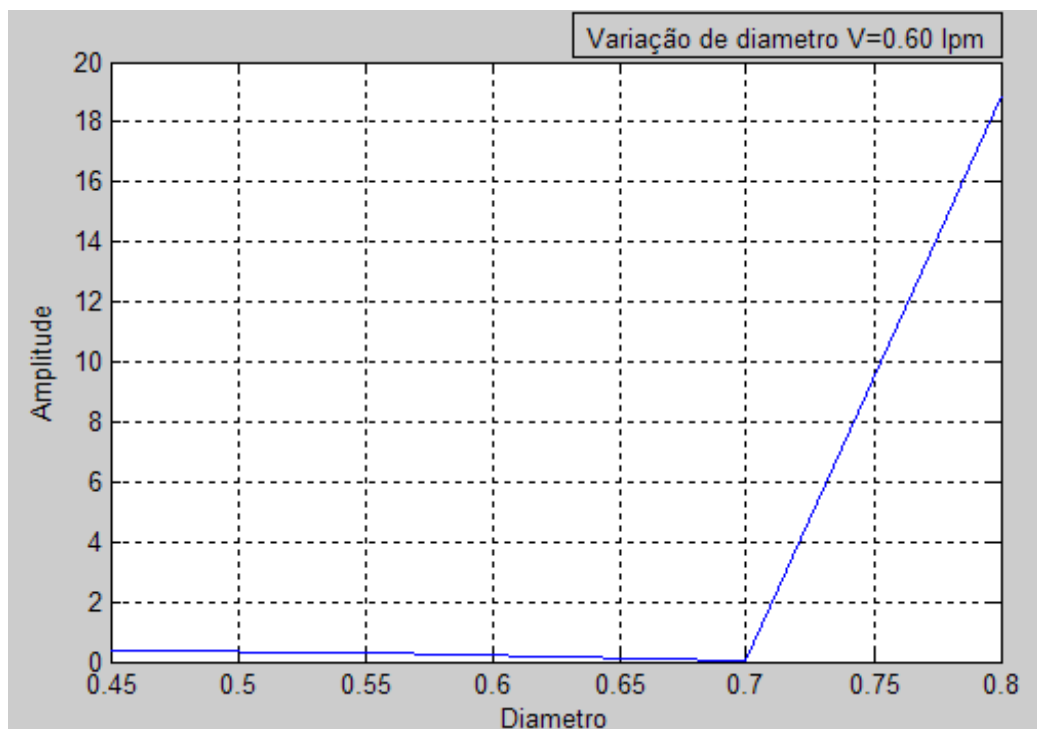


Figura IV.16 - Amplitude x Diâmetro $V=0,60$ lpm.
Escala linear.

Tabela IV.8 - Variação de diâmetro e V=0,70 lpm fixa.

Sinais	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)	Densidade Bolhas	Quantidade Bolhas	Seção Esférica
07 - 04	0,443	0,065	1,76	708	3896,1
07 - 05	0,264	0,066	1,37	551	3941,7
07 - 07	0,091	0,009	0,61	245	2810,8
07 - 08	19,010	0,038	0,45	183	2717,2

Os valores de amplitudes dos espectros de energia dos resíduos, conforme tabela IV.8, apresentaram desempenho com alternância de valores com a manutenção da vazão de 0,70 lpm e com a variação dos valores de diâmetro. Pode-se observar uma alteração brusca da amplitude para o diâmetro de 0,80 mm. O valor de amplitude para o diâmetro de 0,80 mm merece uma análise mais apurada ou mais execuções de simulações. Os valores de amplitudes tiveram desempenho similar, quando comparados aos valores de densidade de bolhas e quantidade de bolhas, exceto para o diâmetro de 0,80 mm.

As frequências relativas aos diâmetros de 0,45 mm e 0,55 mm tiveram valores bem próximos, um valor um pouco mais baixo para o diâmetro de 0,80 mm e um valor menor para o diâmetro de 0,70 mm.

Os valores de densidade de bolhas tiveram um desempenho com alternância de valores para a variação de diâmetro com a vazão fixa de 0,70 lpm. Para os diâmetros de 0,80 mm e 0,70 mm, os valores de densidade de bolhas foram bem próximos e para os diâmetros de 0,45 mm e 0,55 mm a diferença um pouco maior.

As quantidades de bolhas tiveram um desempenho decrescente em relação à variação de diâmetro com a manutenção da vazão de 0,70 lpm.

Os valores referentes às áreas seções transversais esféricas das bolhas tiveram desempenho com alternância de valores em relação à variação de diâmetro.

Os valores das variáveis utilizadas e apresentadas na tabela IV.8 e que serviram de comparação para a caracterização do processo mostraram desempenhos com razoável compatibilidade.

A figura IV.17 refere-se à plotagem dos dados de amplitude versus diâmetro, considerando uma escala logarítmica, que apresenta uma melhor visualização em comparação com a figura IV.18 com escala linear.

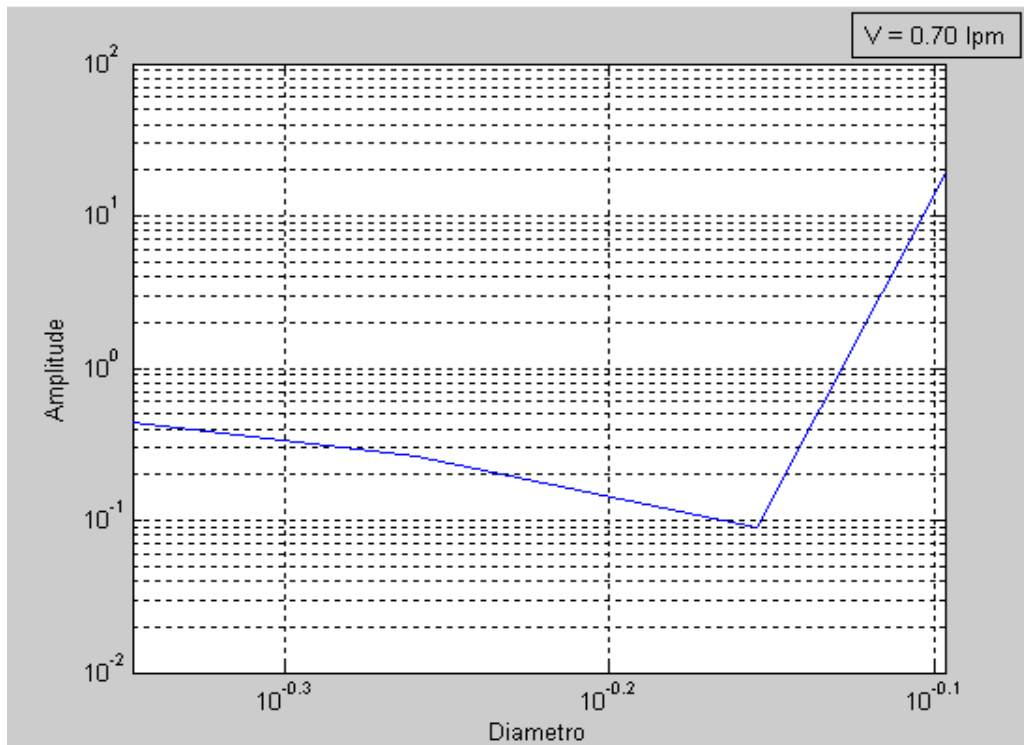


Figura IV.17 - Amplitude x Diâmetro $V=0,70$ lpm.
Escala logarítmica.

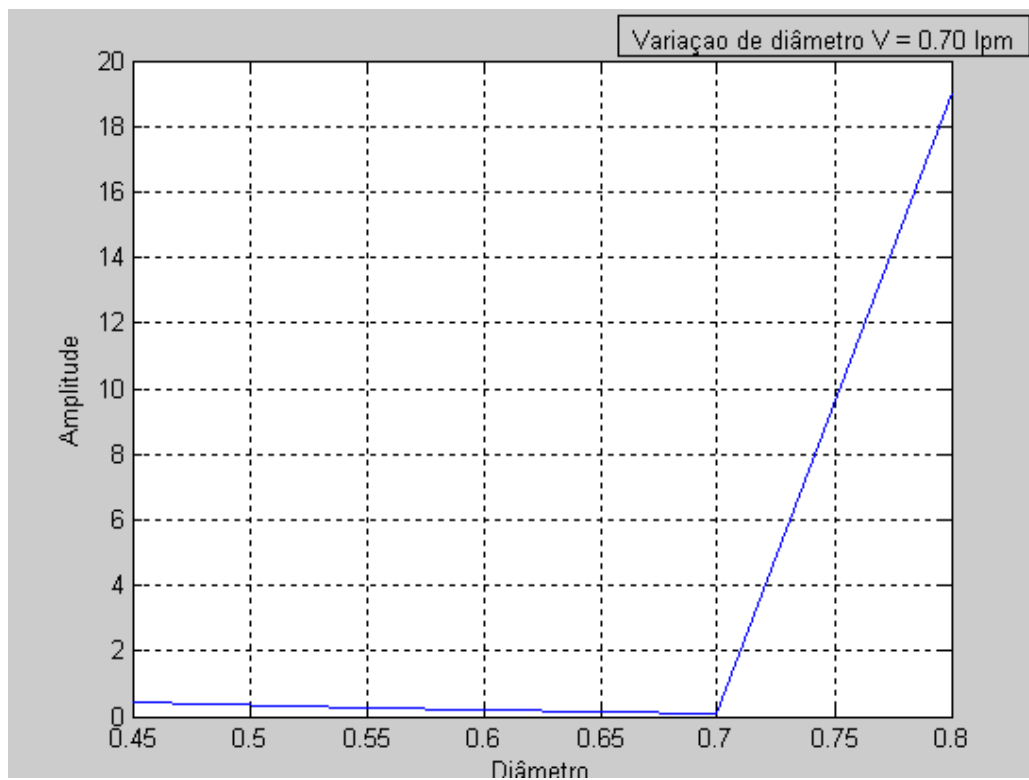


Figura IV.18 - Amplitude x Diâmetro $V=0,70$ lpm.
Escala linear.

Tabela IV.9 - Variação de diâmetro e $V=0,80$ lpm fixa.

Sinais	Amplitude (mV)	Frequência (MHz)	Densidade Bolhas	Quantidade Bolhas	Seção Esférica
08 - 04	19,860	0,034	2,28	919	4771,0
08 - 05	0,161	0,066	1,52	613	4508,1
08 - 07	0,067	0,016	0,92	369	3439,5
08 - 08	18,200	0,036	0,50	202	2786,6

Os valores de amplitudes dos espectros de energia dos resíduos, conforme tabela IV.9, apresentaram desempenho decrescente com a manutenção da vazão de 0,70 lpm e com a variação dos valores de diâmetro. Pode-se observar uma alteração brusca da amplitude para o maior valor de diâmetro. Os valores de amplitudes para os diâmetros de 0,45 mm e 0,80 mm merecem uma análise mais apurada ou mais execuções de simulações, principalmente o diâmetro de 0,80 mm que divergiu em relação ao comportamento dos demais diâmetros em relação aos valores de densidade de bolhas, quantidade de bolhas e seção transversal esférica.

As frequências relativas aos diâmetros de 0,45 mm e 0,80 mm tiveram valores bem próximos, apresentando um valor menor para o diâmetro de 0,70 mm e um valor maior para o diâmetro de 0,55 mm.

Os valores de densidade de bolhas tiveram um desempenho decrescente em relação à variação de diâmetro para a vazão fixa de 0,80 lpm. Para os diâmetros de 0,55 mm, 0,70 mm e 0,80 mm, os valores de densidade de bolhas foram mais próximos e para o diâmetro de 0,45 mm a diferença maior.

As quantidades de bolhas tiveram um desempenho decrescente em relação à variação de diâmetro com a manutenção da vazão de 0,80 lpm.

Os valores referentes às áreas das seções transversais esféricas das bolhas tiveram desempenho decrescente em relação à variação de diâmetro.

Os valores das variáveis utilizadas e apresentadas na tabela IV.9 e que serviram de comparação para a caracterização do processo mostraram desempenhos com razoável compatibilidade.

A figura IV.19 refere-se à plotagem dos dados de amplitude versus diâmetro, considerando uma escala logarítmica, que apresenta uma melhor visualização em comparação com a figura IV.20 com escala linear.

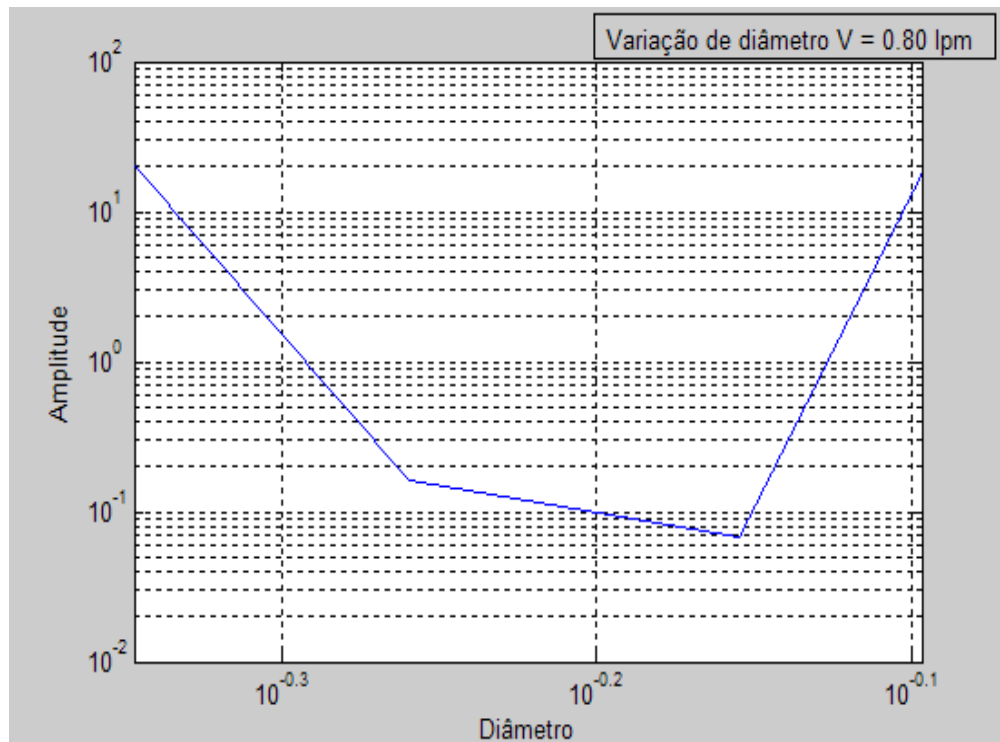


Figura IV.19 - Amplitude x Diâmetro V=0,80 lpm.
Escala logarítmica.

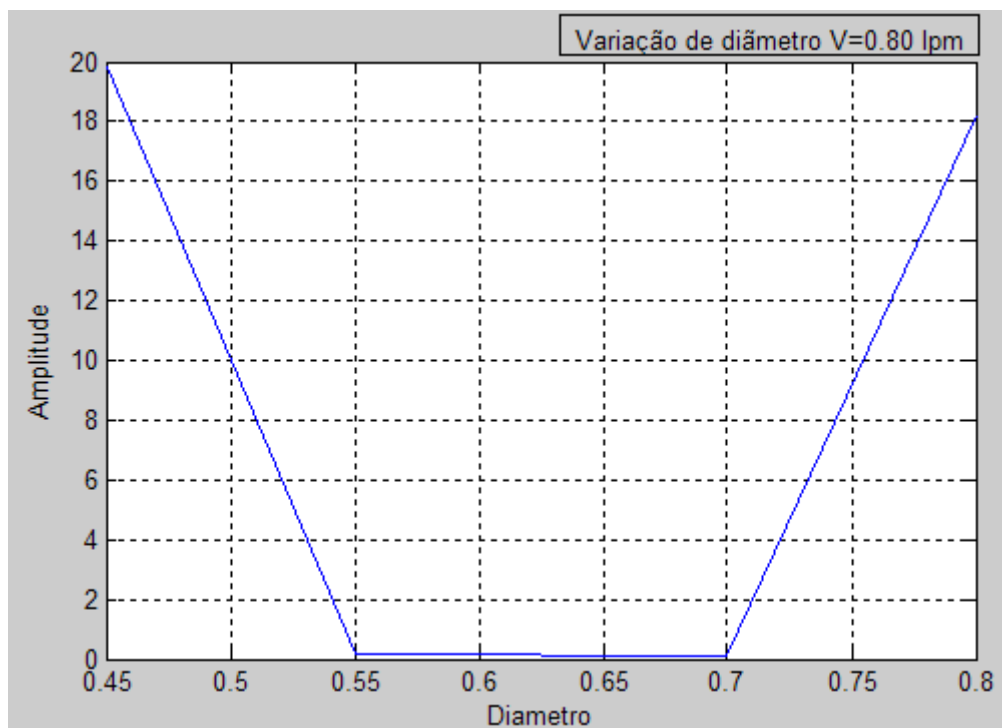


Figura IV.20 - Amplitude x Diâmetro V=0,80 lpm.
Escala linear.

IV.3 - GRÁFICOS DAS AMPLITUDES DOS ESPECTROS DE ENERGIA

A caracterização do processo pode ser definida pela observação da tendência de ocorrência do fenômeno, que servirá como base conclusiva para a extrapolação de um conceito ou lei de formação, a partir da análise do comportamento dinâmico do escoamento e a relação com a quantidade de bolhas geradas, densidade de bolhas e área de seção transversal esférica correspondente a cada um tipo de escoamento.

IV.3.1 - Gráficos das amplitudes dos espectros de energia x diâmetro

Os gráficos mostrados nas figuras IV.21 e IV.22 foram plotados a partir da utilização dos valores máximos de amplitudes dos espectros de energia dos resíduos, contidos nas tabelas existentes no item III.4.2, em função das variações dos valores de diâmetros combinados com as vazões fixas.

As curvas criadas a partir das escalas logarítmicas permitem uma visualização mais clara das famílias de curvas, em contraste com as curvas utilizando escalas lineares, revelando as características da simulação através da análise da lei de formação das curvas superpostas relativas aos processamentos dos sinais de eco de fundo, onde as curvas apresentam uma tendência de ocupação de uma determinada região na área do gráfico.

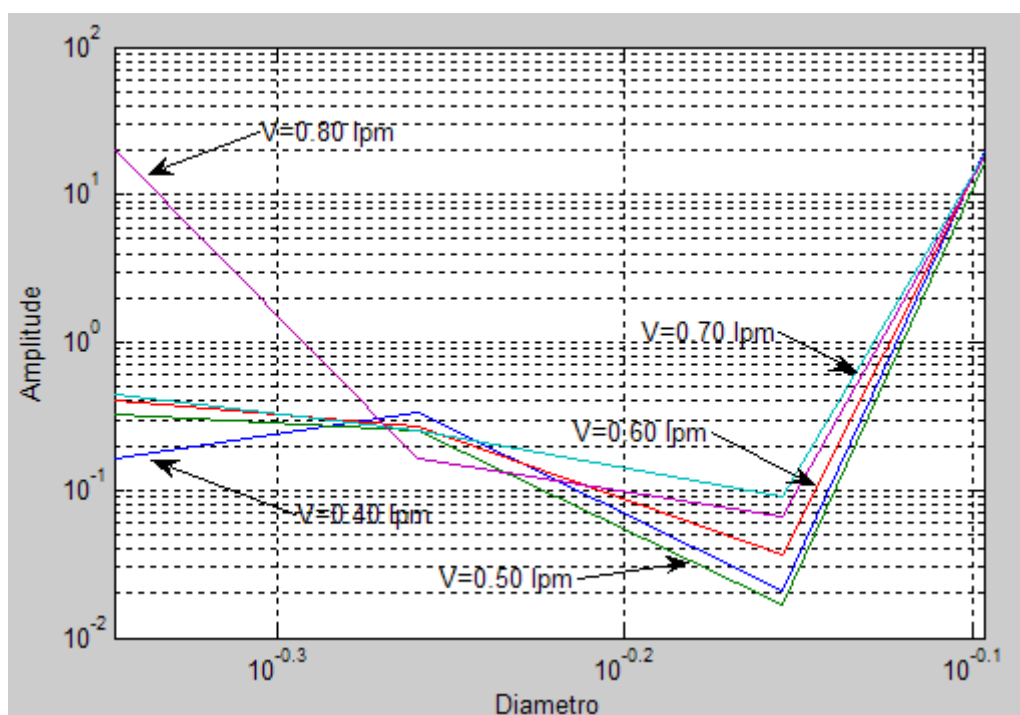


Figura IV.21 - Amplitude x Diâmetro.

Escala logarítmica.

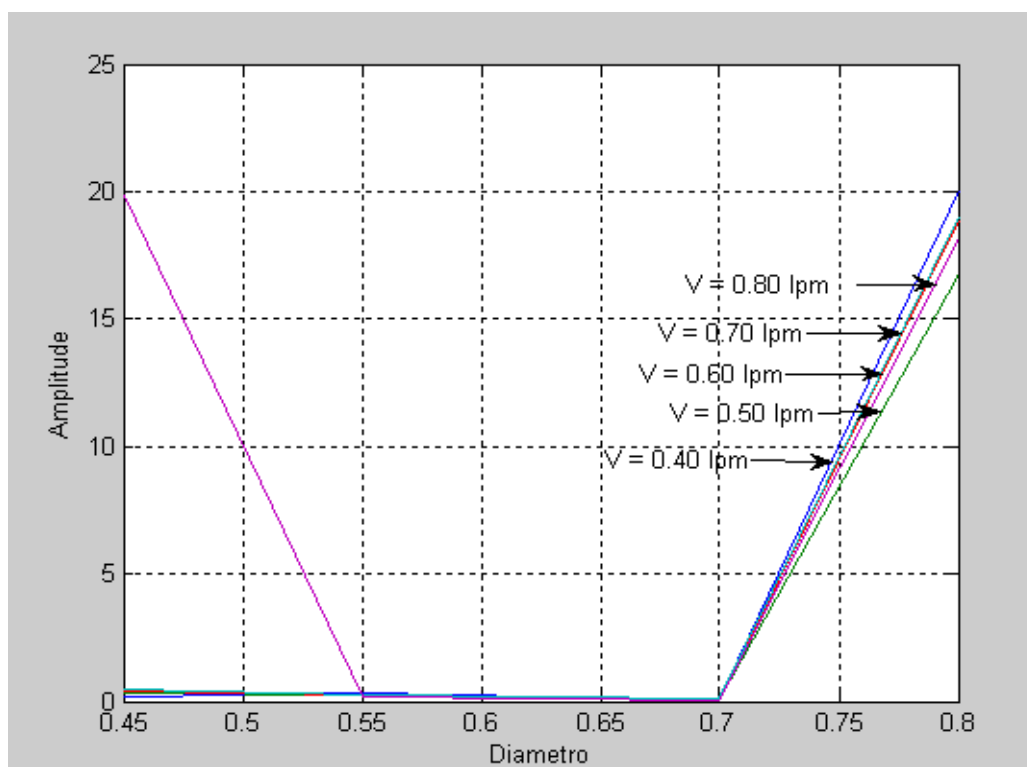


Figura IV.22 - Amplitude x Diâmetro.

Escala linear.

IV.3.2 - Gráficos das amplitudes dos espectros de energia x vazão

As curvas superpostas IV.23 e IV.24 plotadas em função da variação das vazões, não apresentam uma característica marcante em comparação com aquelas em função do diâmetro, no sentido de permitir esboçar uma tendência de ocupação de uma região do gráfico, revelando que as características dos resultados desta simulação não tem a mesma tendência das anteriores, contidas nos gráficos IV.21 e IV.22.

As famílias de curvas criadas a partir das escalas logarítmicas, da mesma forma que as anteriores, permitem uma visualização mais clara das famílias de curvas, em contraste com as curvas utilizando escalas lineares, onde os efeitos dos valores obtidos nas simulações ficam mais evidentes e podem ser confrontados com as análises efetuadas nos desempenhos das variáveis utilizadas.

Os gráficos mostrados nas figuras IV.23 e IV.24 foram plotados a partir da utilização dos valores máximos de amplitudes dos espectros de energia dos resíduos, contidos nas tabelas existentes no item III.5.2, em função das variações dos valores de vazões combinados com os diâmetros fixos, de modo a permitir uma melhor visualização para identificação de similaridades de comportamento entre as características das simulações executadas com a variação da vazão.

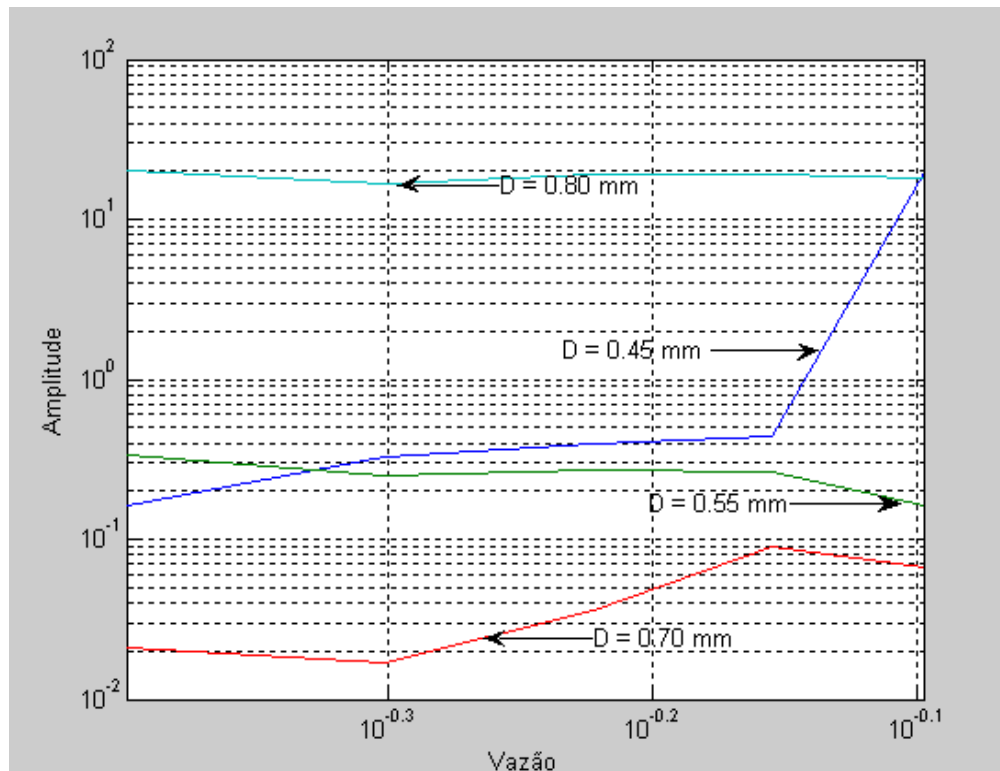


Figura IV.23 - Amplitude x Vazão.
Escala logarítmica.

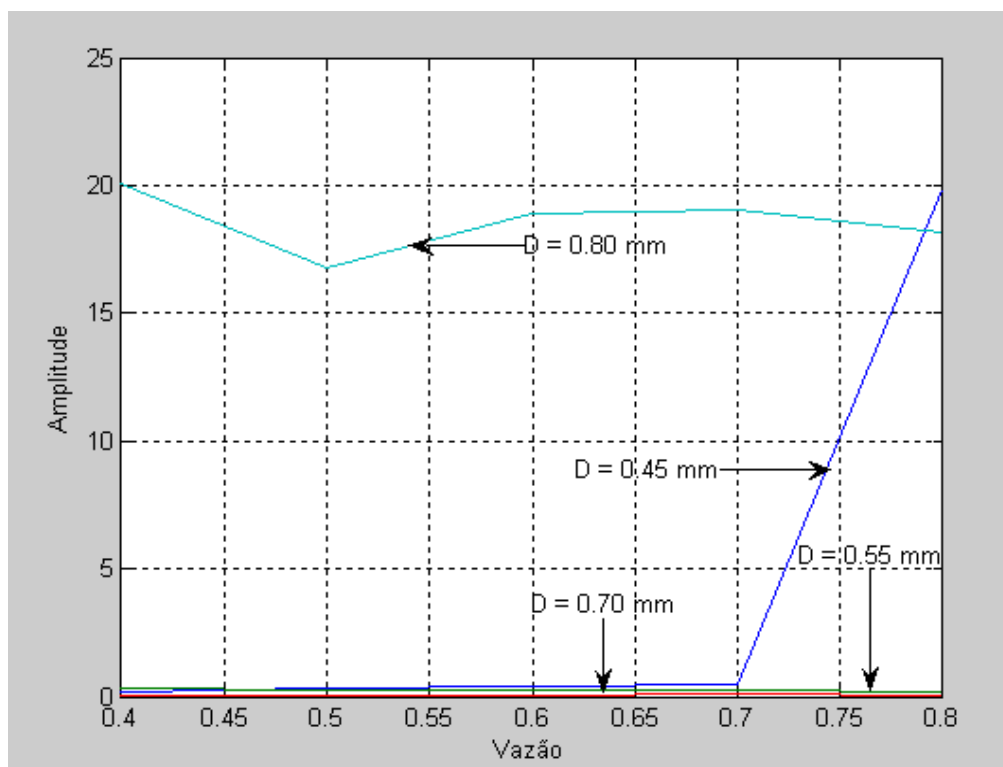


Figura IV.24 - Amplitude x Vazão.
Escala linear.

IV.3.3 - Gráficos dos demais parâmetros em função do diâmetro

Os gráficos mostrados nas figuras IV.25 a IV.30 foram plotados a partir da utilização dos valores de densidades de bolhas, quantidade de bolhas e seções esféricas transversais de bolhas, contidos no item III.4.2, onde se observa a existência de uma correlação entre os comportamentos das variações de diâmetros em função dos parâmetros citados, para se efetuar a comparação com as curvas obtidas a partir das amplitudes dos espectros de energia dos resíduos também em função dos diâmetros.

A correlação citada, na comparação entre as curvas, apresentaria maior semelhança, se a medida da divergência em relação às escalas dos valores simulados fôsse menor, o que causaria menos influência na inflexão dos pontos das curvas obtidas. As densidades de bolhas podem servir de único parâmetro de comparação, pois relaciona diretamente as quantidades de bolhas pela área fotografada do escoamento. As áreas das seções transversais, por seu turno, contribuem para a quantidade de sinal refletido pelas paredes das bolhas.

As escalas logarítmicas e lineares utilizadas apresentam flagrantes semelhanças, fato este que comprova a linearidade dos valores calculados, que relaciona quantidades de bolhas em função de volume de líquido ou área de seção longitudinal ao escoamento das bolhas.

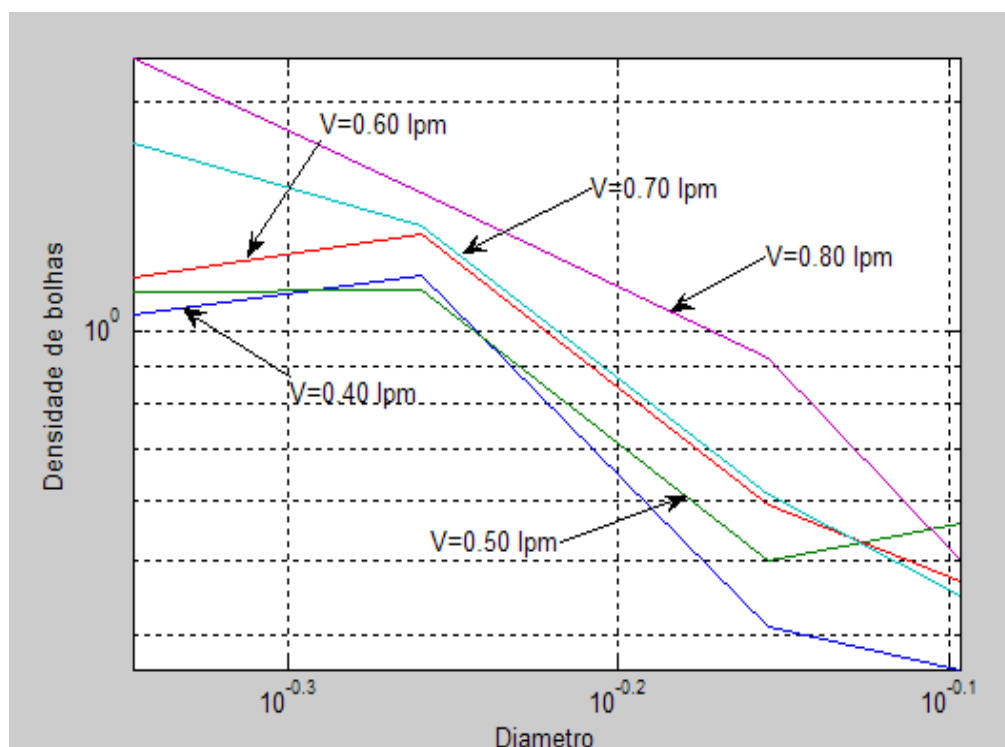


Figura IV.25 - Densidade de bolhas x Diâmetro.
Escala logarítmica.

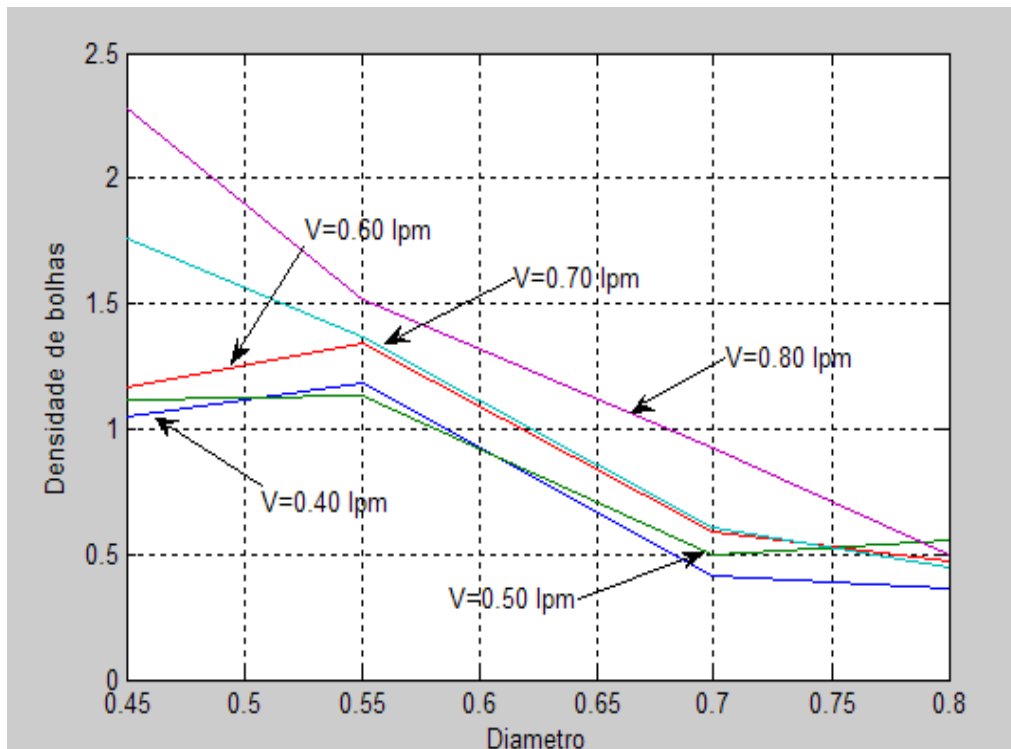


Figura IV.26 - Densidade de bolhas x Diâmetro.
Escala linear.

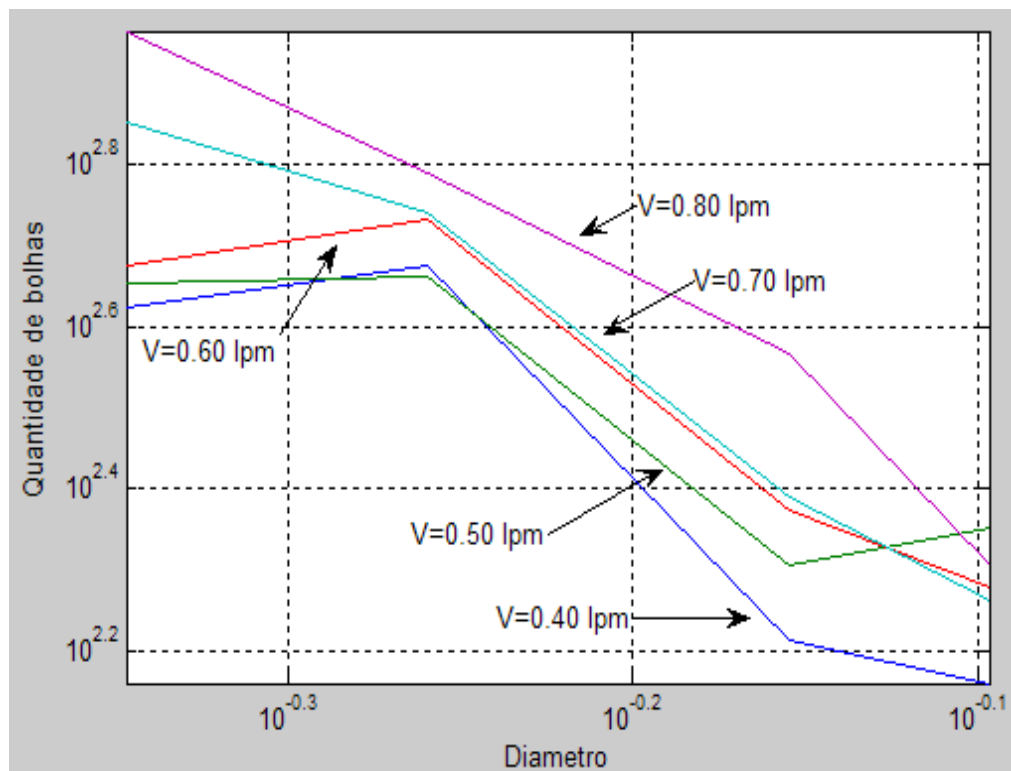


Figura IV.27 - Quantidade de bolhas x Diâmetro.
Escala logarítmica.

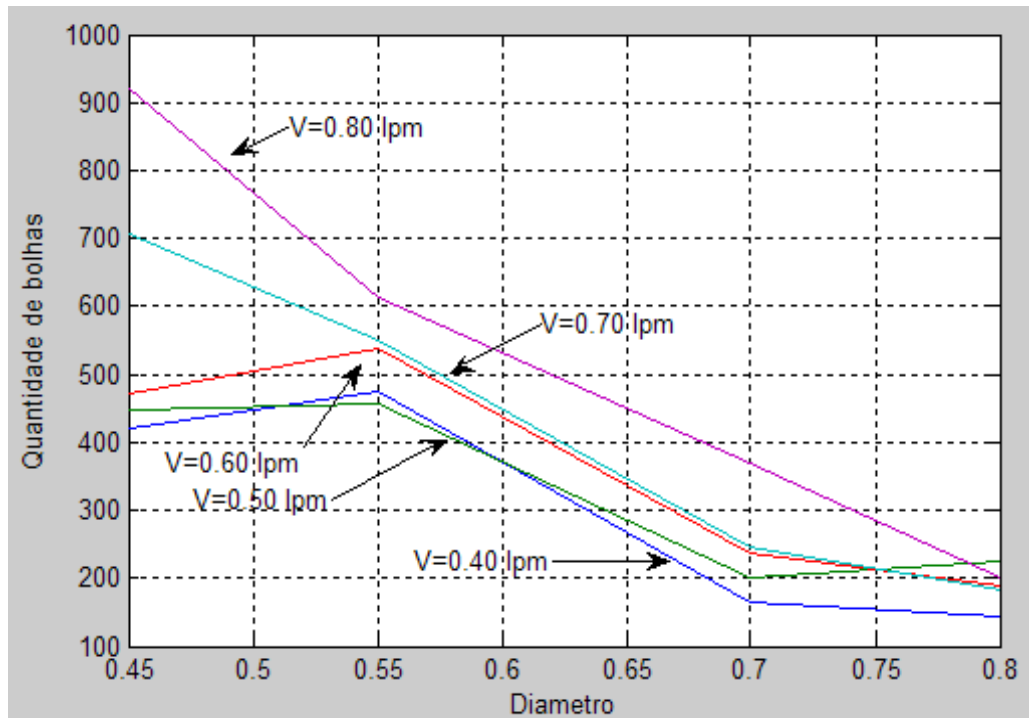


Figura IV.28 - Quantidade de bolhas x Diâmetro.
Escala linear.

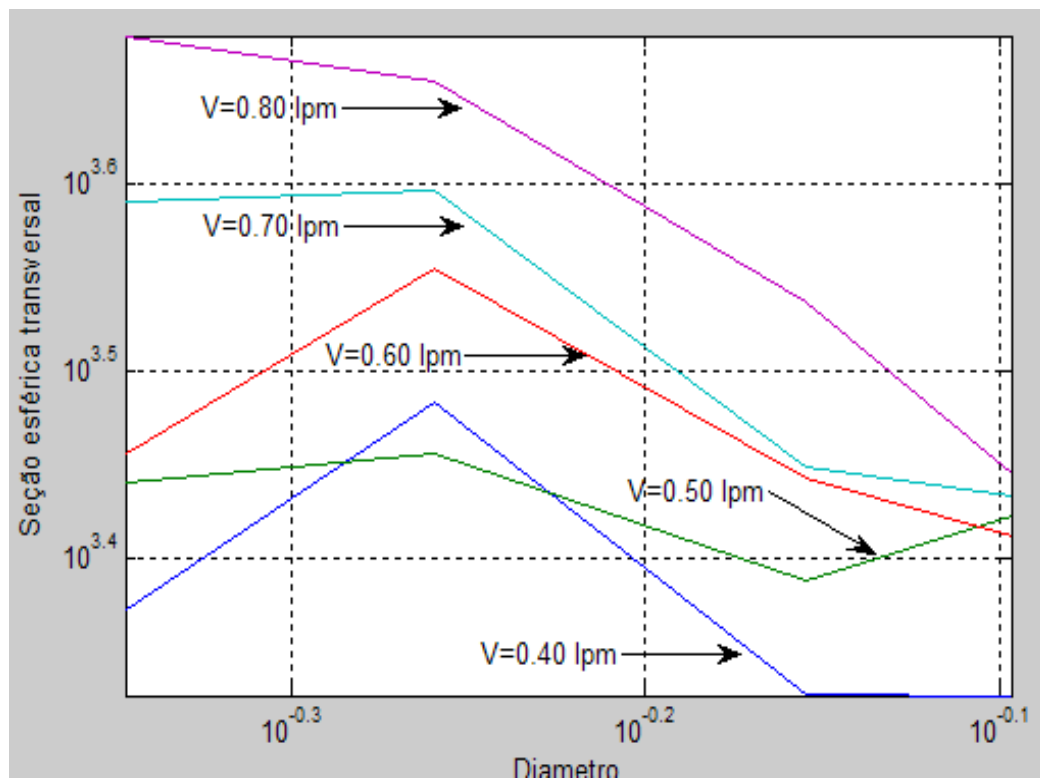


Figura IV.29 - Seção esférica x Diâmetro.
Escala logarítmica.

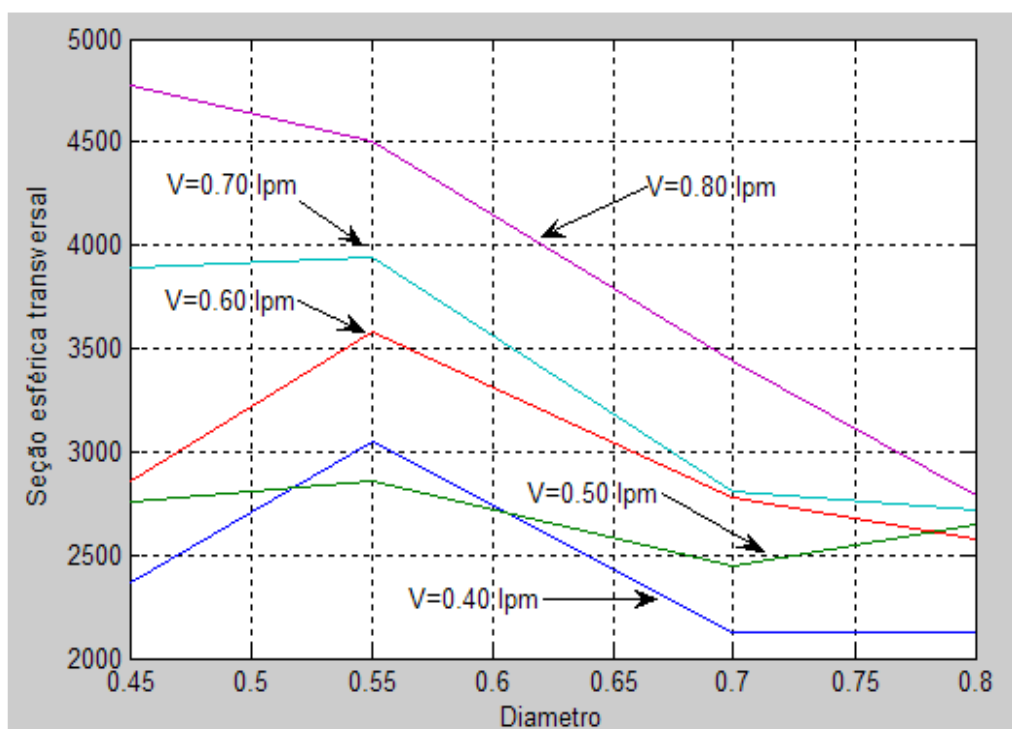


Figura IV.30 - Seção esférica x Diâmetro.

Escala linear.

IV.3.4 - Gráficos dos demais parâmetros em função da vazão

Os gráficos mostrados nas figuras IV.31 a IV.36 foram plotados a partir da utilização dos valores de densidades de bolhas, quantidade de bolhas e seções esféricas de bolhas, contidos no item III.4.2, onde se observa a existência de uma correlação entre os comportamentos das variações de vazões em função dos parâmetros citados, para se efetuar a comparação com as curvas obtidas a partir das amplitudes dos espectros de energia dos resíduos também em função das vazões.

A correlação citada, na comparação entre as curvas, apresentaria maior semelhança, se a medida da divergência em relação às escalas dos valores simulados também fôsse menor, o que causaria menos influência na inflexão dos pontos das curvas obtidas. As densidades de bolhas também podem servir de parâmetro de comparação, pois se relaciona diretamente com as quantidades de bolhas. As áreas das seções esféricas transversais, por seu turno, contribuem para a quantidade de sinal refletido pelas paredes das bolhas.

As escalas logarítmicas e lineares utilizadas apresentam flagrantes semelhanças, fato este que comprova a linearidade dos valores calculados, que relaciona quantidades de bolhas em função de volume de líquido ou área de seção longitudinal ao escoamento das bolhas.

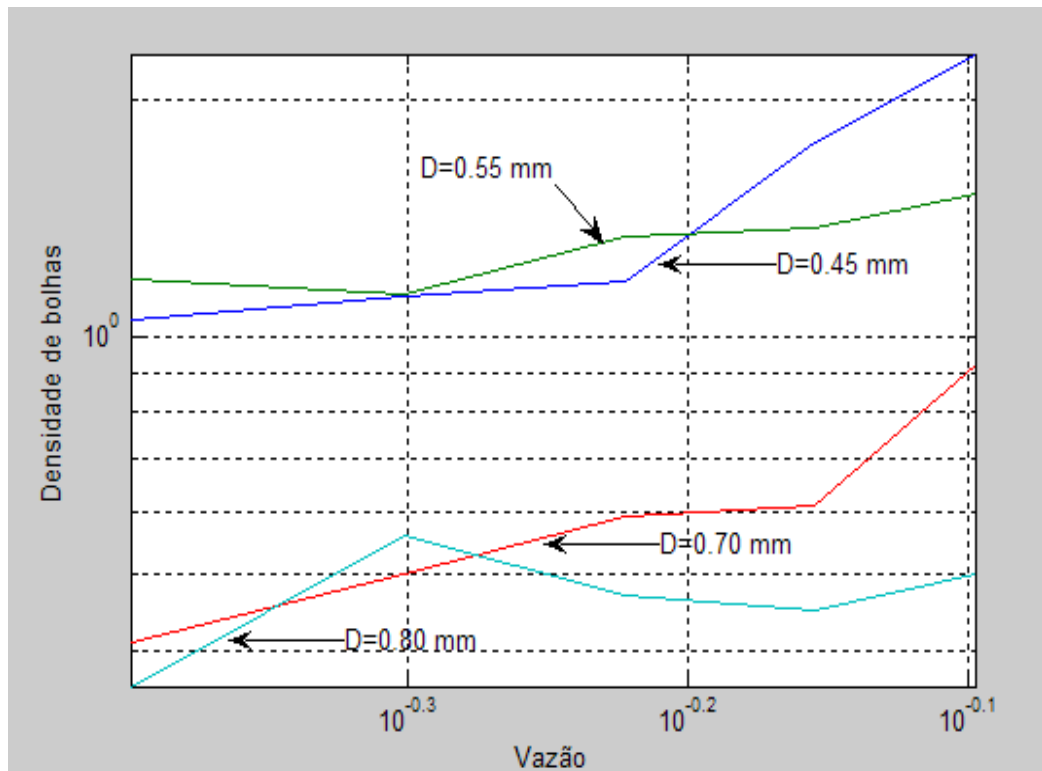


Figura IV.31 - Densidade de bolhas x Vazão.
Escala logarítmica.

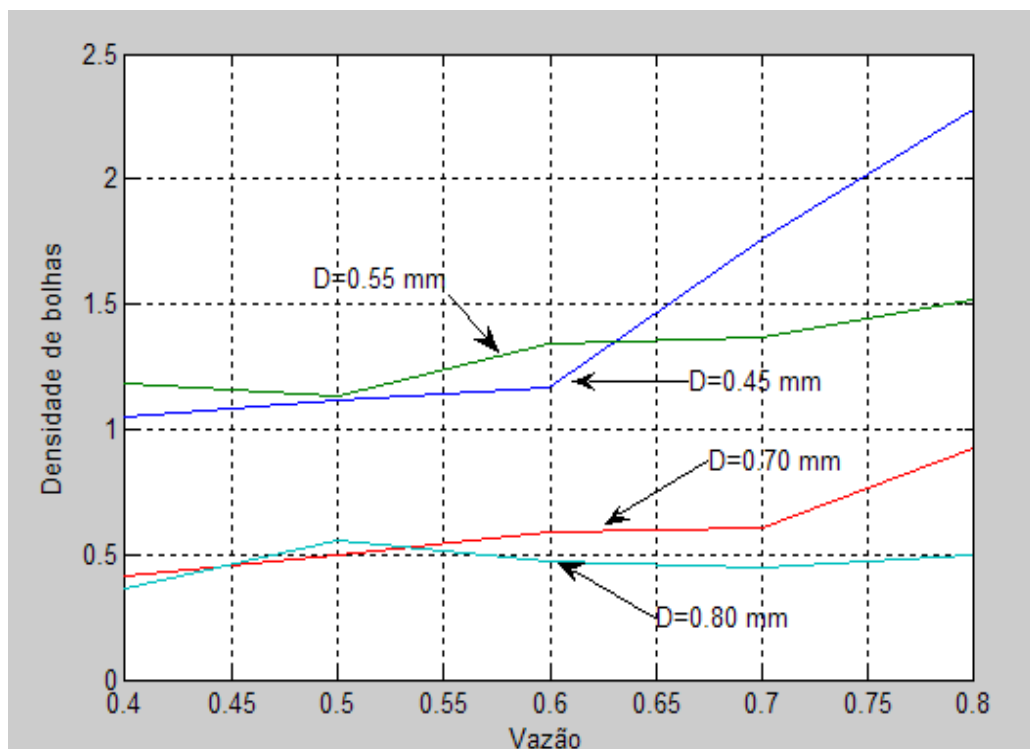


Figura IV.32 - Densidade de bolhas x Vazão.
Escala linear.

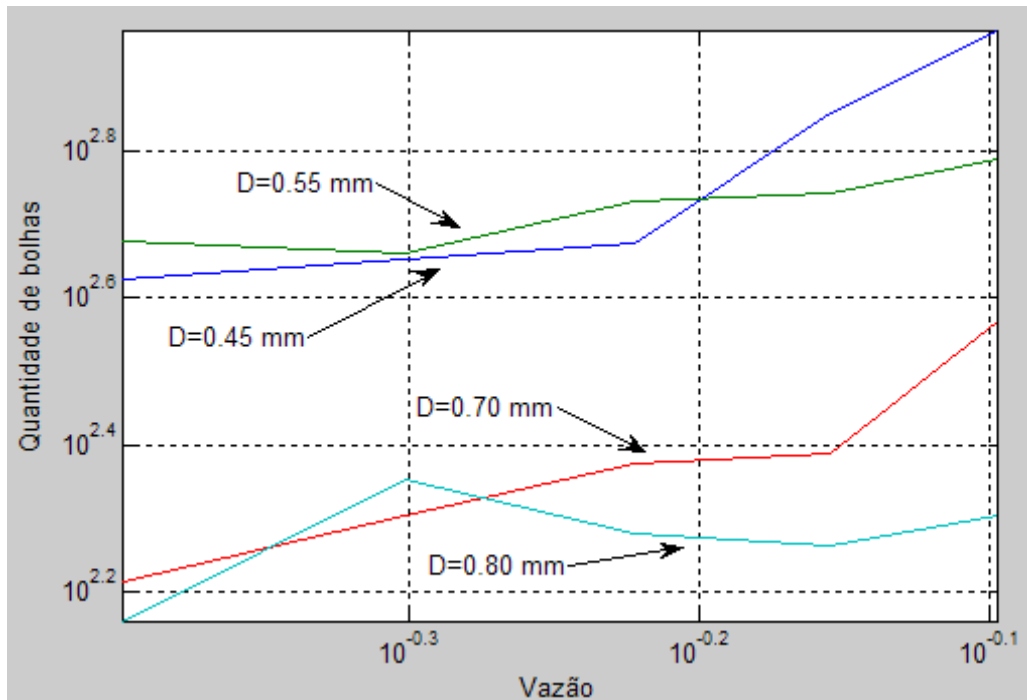


Figura IV.33 - Quantidade de bolhas x Vazão.
Escala logarítmica.

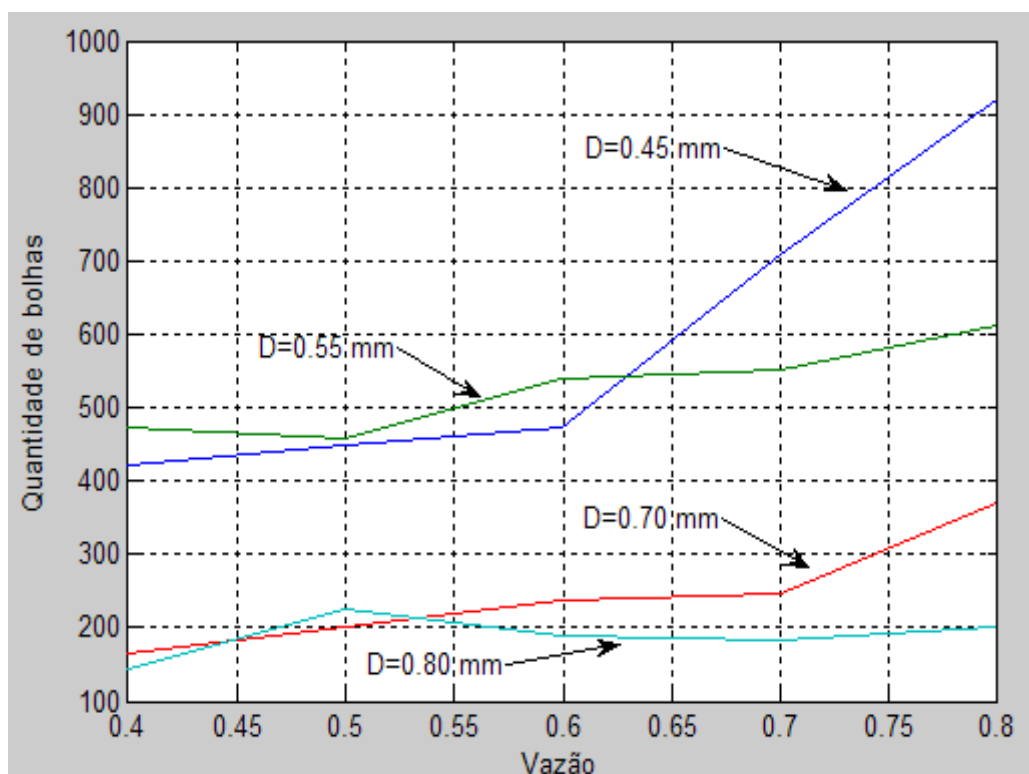


Figura IV.34 - Quantidade de bolhas x Vazão.
Escala linear.

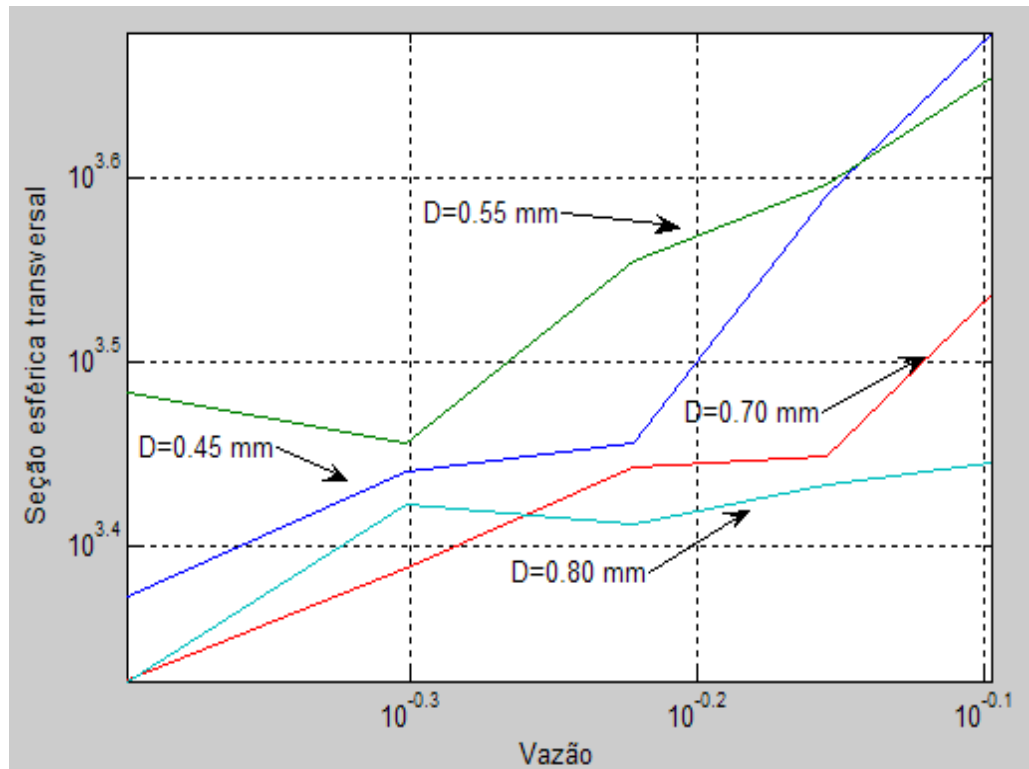


Figura IV.35 - Seção esférica x Vazão.
Escala logarítmica.

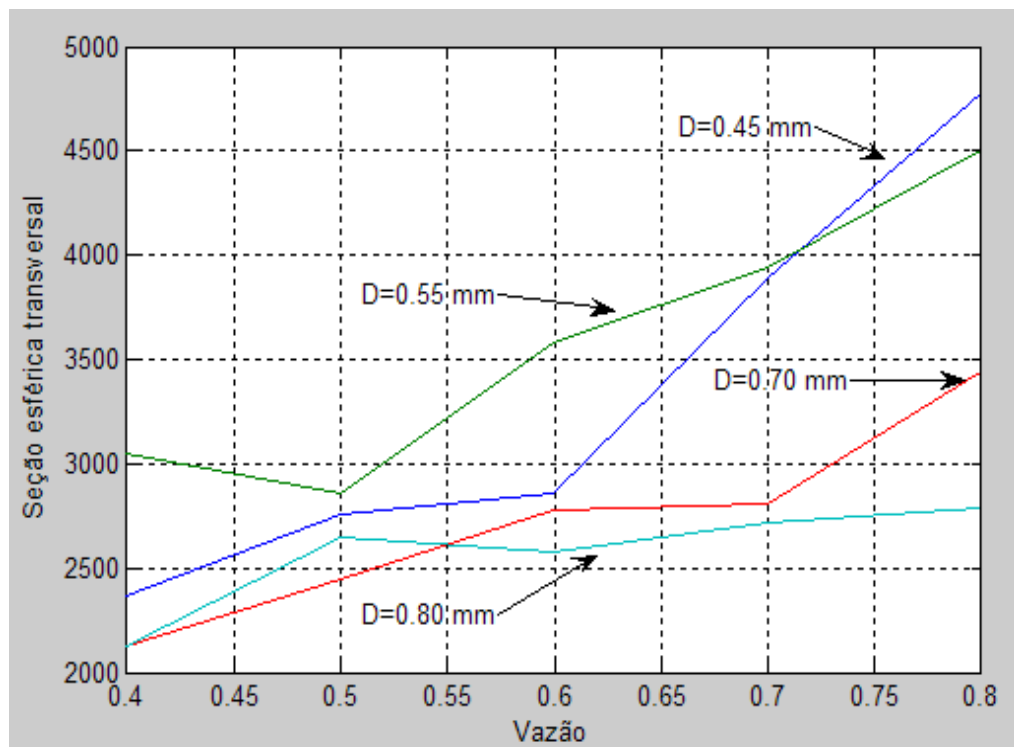


Figura IV.36 - Seção esférica x Vazão.
Escala linear.

IV.3.5 - Análise em função dos valores médios

As informações de amplitude, densidade de bolhas, quantidade de bolhas e seção esférica transversal, da tabela IV.10, estão relacionados aos diâmetros dos obturadores através de valores médios dos resultados obtidos na simulação, em função da variação da vazão. A amplitude média mostrada na figura IV.37 diverge em relação às figuras IV.38 a IV.40 somente para o diâmetro de 0,80 mm. A seção esférica média mostrada na figura IV.40 diverge em relação às figuras IV.37 a IV.39 somente para o diâmetro de 0,55 mm.

Tabela IV.10 - Valores médios x Diâmetros.

Diâmetros (mm)	Amplitude	Densidade	Quantidade Bolhas	Seção Esférica
0.45	4,238	1,476	603,8	3328,8
0.55	0,255	1,308	526,8	3587,5
0.70	0,046	0,606	243,4	2720,6
0.80	18,592	0,488	189,2	2571,6

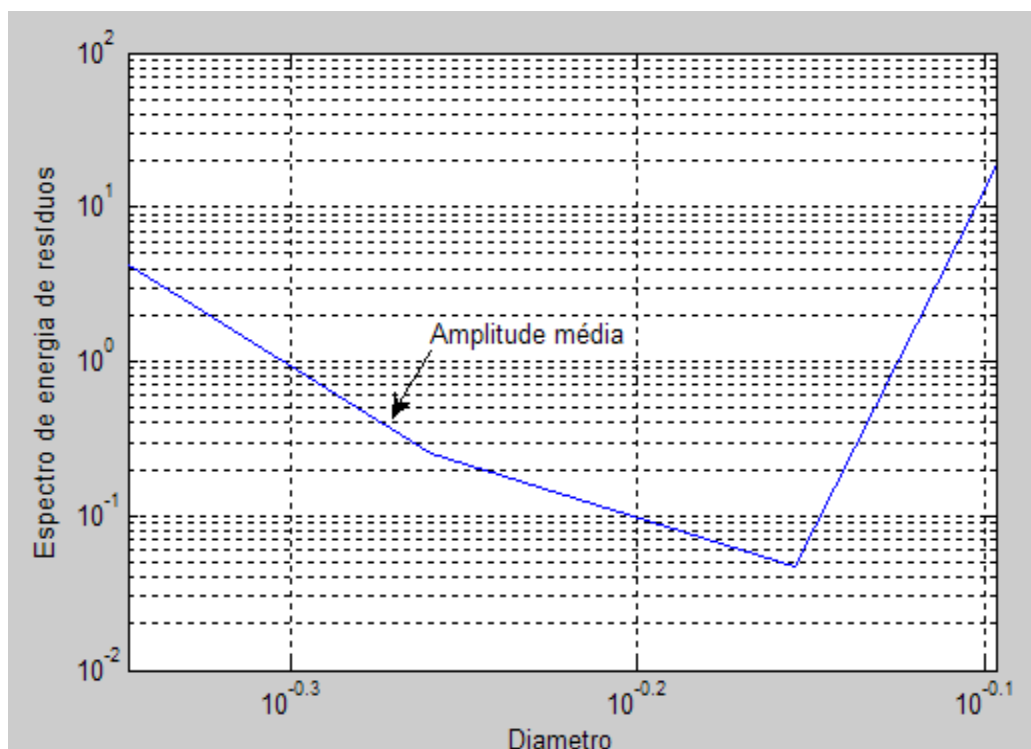


Figura IV.37 - Amplitude média x Diâmetro.
Escala logarítmica.

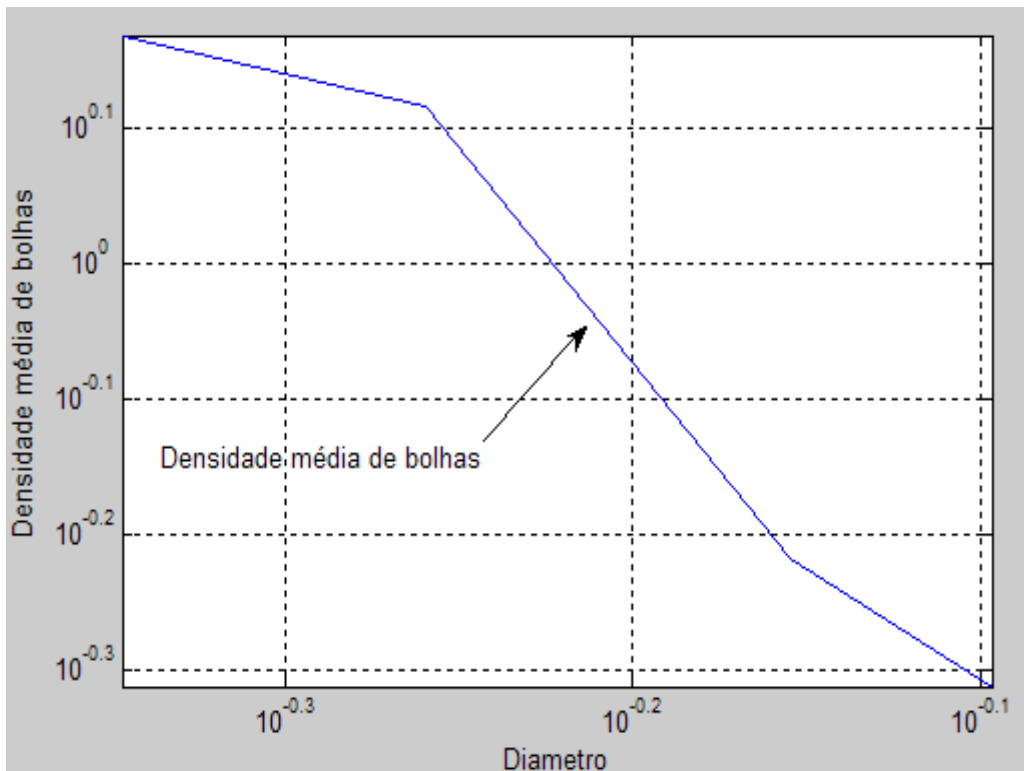


Figura IV.38 - Densidade média x Diâmetro.
Escala logarítmica.

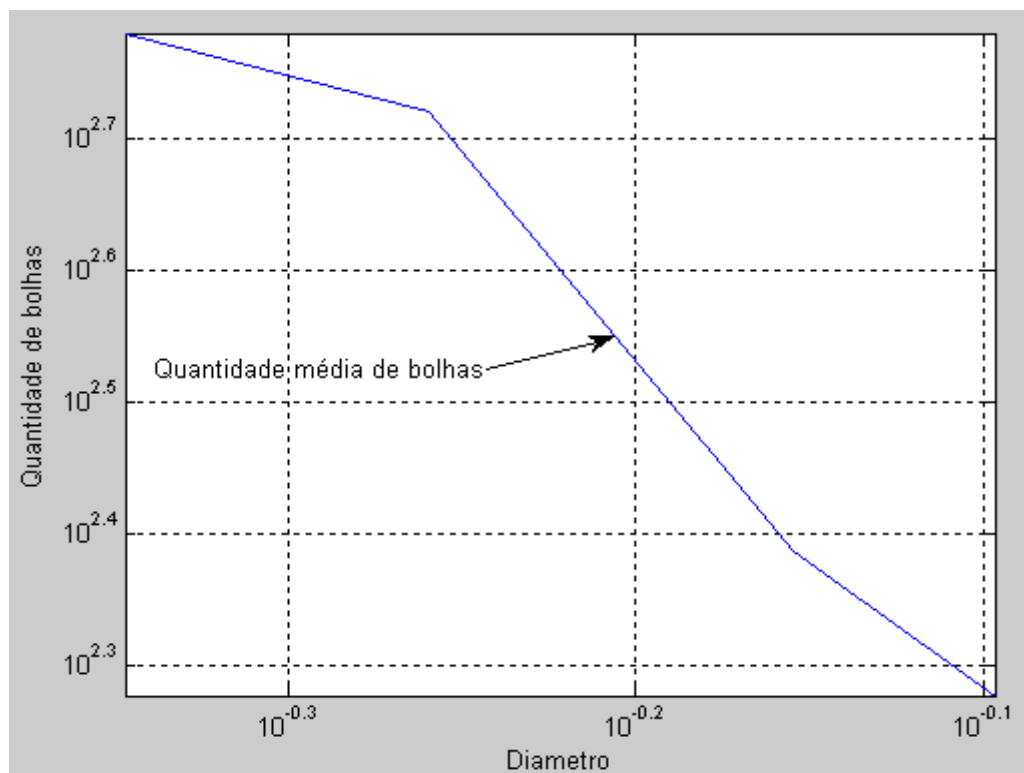


Figura IV.39 - Quantidade média x Diâmetro.
Escala logarítmica.

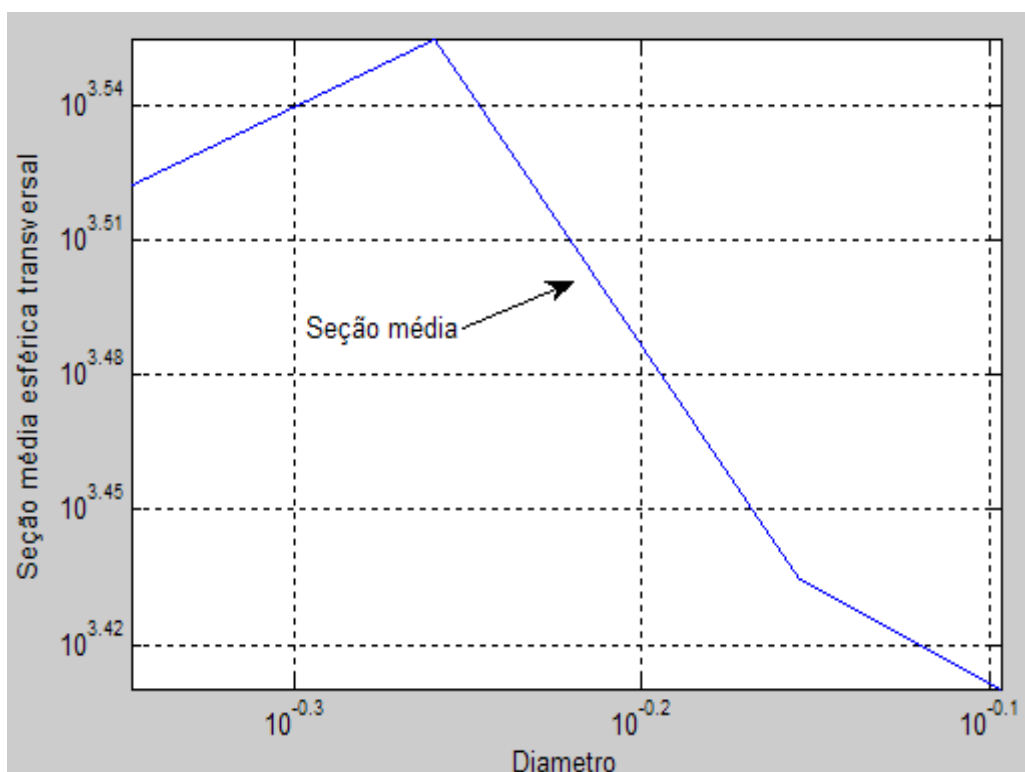


Figura IV.40 - Seção média x Diâmetro.
Escala logarítmica.

As informações de amplitude, densidade de bolhas, quantidade de bolhas e seção esférica transversal, da tabela IV.11, estão relacionados às vazões dos escoamentos através de valores médios dos resultados obtidos na simulação, em função da variação de diâmetro. A amplitude média mostrada na figura IV.41 diverge em relação às figuras IV.42 a IV.44 somente para a vazão de 0,40 lpm. As figuras IV.42 a IV.44 apresentam uma perfeita correspondência entre valores e tendências das curvas.

Tabela IV.11 - Valores médios x Vazões.

Vazões (lpm)	Amplitude	Densidade Bolhas	Quantidade Bolhas	Seção Esférica
0.40	5,143	0,750	301,3	2415,3
0.50	4,351	0,840	333,3	2678,3
0.60	4,896	0,843	359,5	2949,5
0.70	4,952	1,048	421,8	3341,5
0.80	9,572	1,305	525,8	3876,3

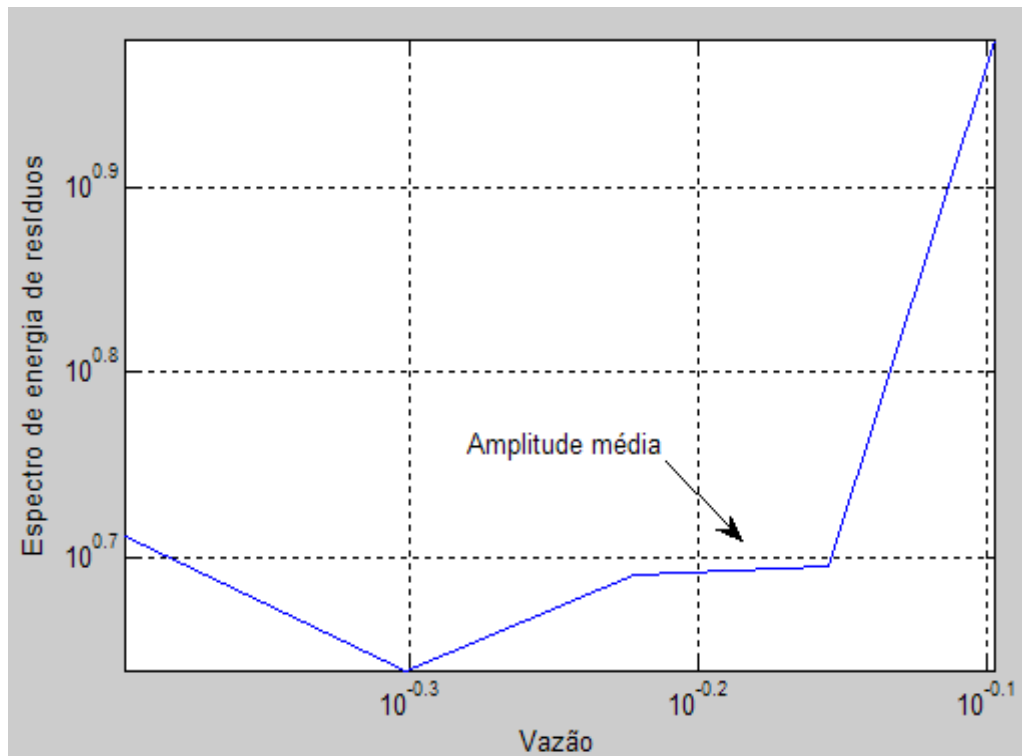


Figura IV.41 - Amplitude média x Vazão.
Escala logarítmica.

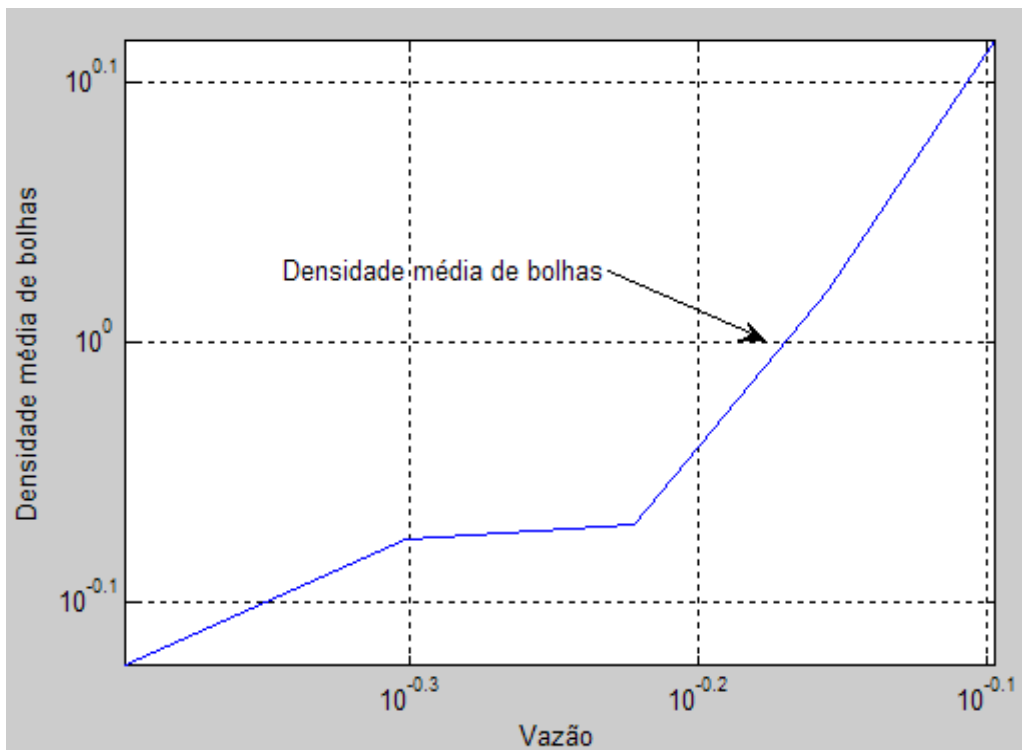


Figura IV.42 - Densidade média x Vazão.
Escala logarítmica.

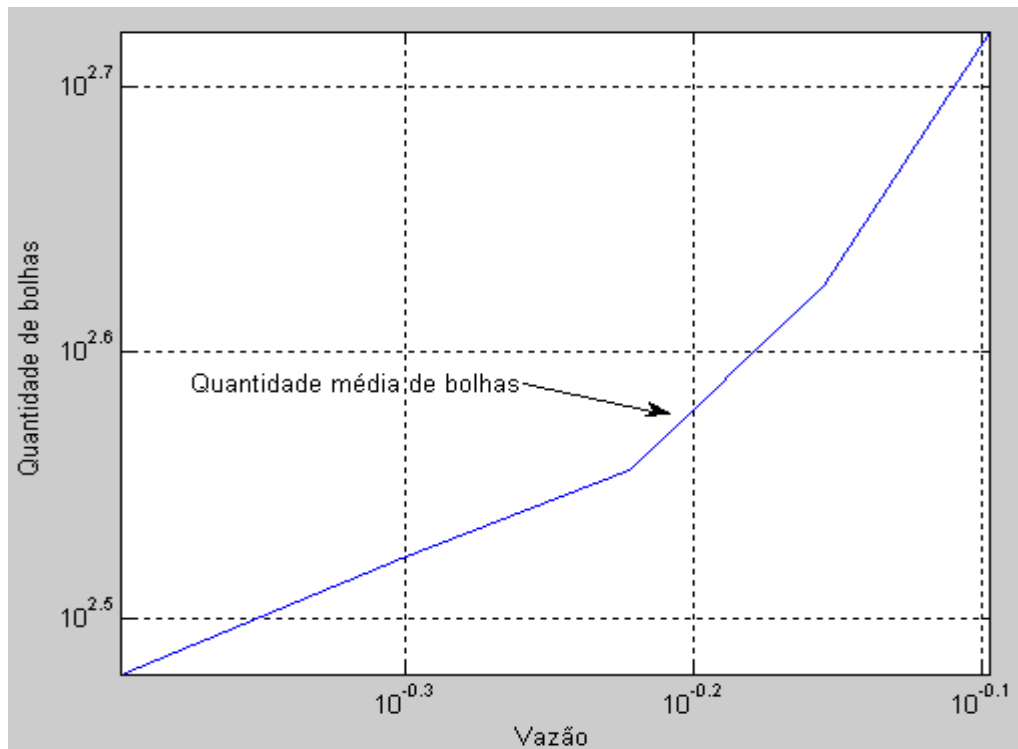


Figura IV.43 - Quantidade média x Vazão.
Escala logarítmica.

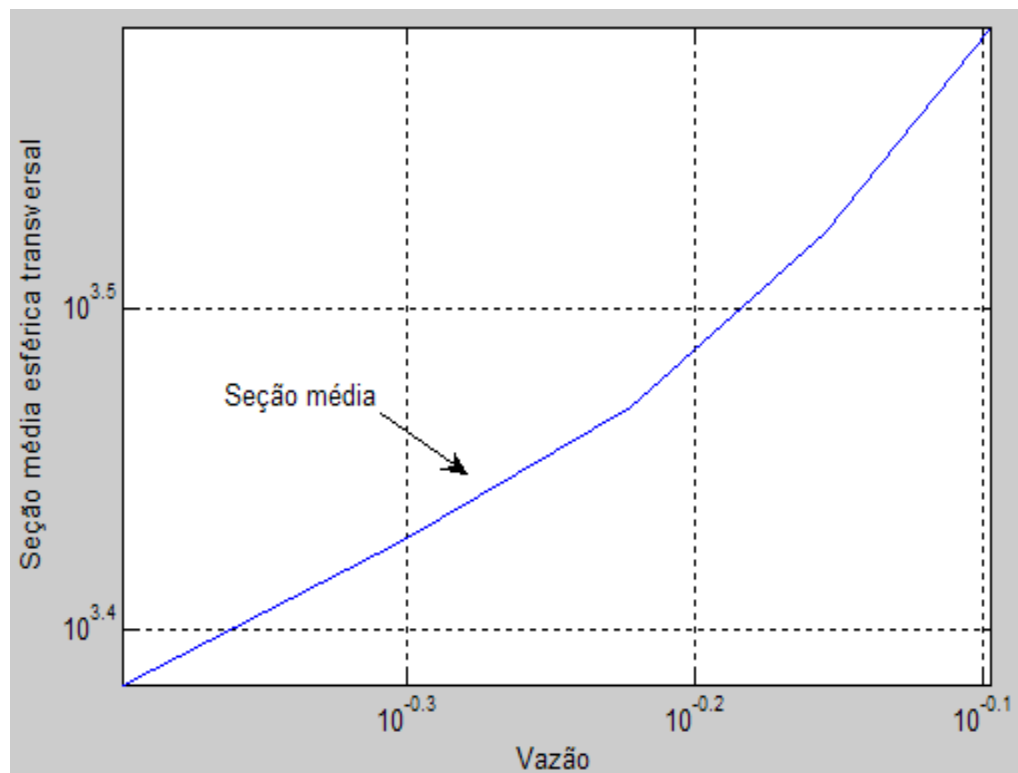


Figura IV.44 - Seção média x Vazão.
Escala logarítmica.

CONCLUSÃO

O objetivo principal foi apresentar uma pesquisa na qual pudesse realçar a aplicação de uma moderna tecnologia em processamento de sinais, de modo a provocar a quebra de paradigmas correntes na caracterização de uma situação real pelo funcionamento de um protótipo, na área de ensaios não destrutivos, a partir de uma ótica de identificação de causas existentes para modificação de sinal ultra-sônico de eco de fundo, utilizando a filtragem de sinais com a aplicação da transformada wavelet e resguardando os resíduos retirados do sinal original, para realçá-los como agentes das interferências de modificação do sinal original e, conseqüentemente, utilizar sua ocorrência como fator de caracterização para os escoamentos gerados a partir do fenômeno de ação e reação, ou seja, geração de bolhas provocando interferências, estas gerando resíduos, estes gerando espectros de energia e por fim estes definindo a caracterização.

A caracterização deste processo serve de base de observação da tendência de ocorrência dos fenômenos aleatórios de escoamentos bifásicos, como base de pesquisa para a extrapolação de um conceito ou lei de formação, a partir da análise do comportamento dinâmico do escoamento e a relação com as amplitudes dos espectros de energia dos resíduos, quantidades de bolhas geradas, densidades de bolhas e áreas de seções transversais esféricas correspondentes a cada tipo de escoamento simulado.

As informações referentes aos valores de densidade de bolhas, quantidade de bolhas e seção esférica transversal também apresentaram alguns pontos divergentes para diâmetros ou vazões, em comparação com as amplitudes dos espectros de energia dos resíduos, o que é aceitável para a característica aleatória do sistema abordado, necessitando de um número maior de trabalhos de pesquisa para sua consolidação, a partir de novos ângulos de abordagem, criando novos paradigmas.

A partir das análises das curvas, conclui-se que as escalas lineares não são adequadas como parâmetros de comparação entre as curvas do espectro de energia dos resíduos dos sinais de eco de fundo e as demais curvas que apresentam relação entre si por valores lineares, devendo-se utilizar as curvas logarítmicas como parâmetro de análise comum às mesmas.

As correlações das informações referentes às amplitudes dos espectros de energia dos resíduos, densidades de bolhas, quantidades de bolhas e seções esféricas transversais de bolhas apresentaram resultados satisfatórios, o que comprova a eficiência e importância do uso da **TW** na caracterização de escoamentos bifásicos.

RECOMENDAÇÕES

A utilização de **TW** abre uma nova perspectiva sobre futuros trabalhos na área de **END** no âmbito do **MT**, visto que esta é uma ferramenta matemática que se apresenta mais adequada, em análise de sistemas não estacionários em termos de processamento de sinais, em relação a outras de aplicações clássicas.

As mais recentes pesquisas sobre wavelets indicam a comprovação da tendência de sua utilização de forma mais ampla e com demandas crescentes em aplicações variadas das diversas famílias wavelets, nos campos da matemática, engenharia, economia, estatística, área biomédica, área nuclear e outros.

O aumento da massa crítica de pesquisa nesta área de estudo possibilita o surgimento de uma nova linha de pesquisa tecnológica, tanto para dissertações de mestrado quanto para teses de doutorado, em virtude da flexibilidade e importância desta ferramenta e sua inserção nos processos que requerem amostragem de sinal, tanto em função do tempo quanto da frequência.

Para aprofundamento nesta linha de pesquisa sugere-se a comparação dos resultados obtidos com a utilização de outras famílias wavelets, outros níveis de discretização, comparação com filtros tradicionais e ampliação do número de vazões e diâmetros para simulação, para aplicações na análise de comportamento de escoamentos bifásicos em processos ou equipamentos industriais.

A importância da utilização de ferramentas matemáticas tradicionais, que possam ser comparadas com as wavelets, contribuirá sobremaneira para ratificar a eficiência da metodologia utilizada, quando as parcelas de resíduos oriundas da filtragem do sinal de eco de fundo forem utilizadas para caracterização do processo, o que vislumbra outras aplicações similares através da ótica de realçar a importância também dos ruídos como agente do processo e não simplesmente do sinal emitido.

Outra recomendação, também importante, é a aplicação de wavelet no processamento das imagens fotográficas obtidas com a simulação, de modo a caracterizar o processo por reconhecimento de padrão de imagem, que permita utilizá-lo como referência para identificação de escoamentos bifásicos, em função da forma e quantidade de bolhas geradas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MELO, L. P.; *Metodologia ultra-sônica para detecção de sistemas bifásicos ar-água em circuito de refrigeração de reatores nucleares*, Projeto final de graduação. Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET/RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.
- [2] CUNHA FILHO, J. S.; *Metodologia ultra-sônica para caracterização de escoamento bifásico*, Dissertação de Mestrado, PPTec/CEFET/RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- [3] GRAPS, A.; "An Introduction to Wavelets". *IEEE Computational Science and Engineering*, Los Vaqueros Circle, California, USA, 1995.
- [4] VIDAKOVIC, B.; MÜLLER, P.; "Wavetes for kids. A tutorial intoduction". Duke University, 42A06, 41A05, 65d05, 1-26., 1991.
- [5] NEMETH, A.B.; "On Alfred Haar's original proof of this theorem on best approximation". *A Haar Memorial Conference I, II*, Amsterdam - New York, pp. 651-659, 1987.
- [6] TEOLIS, A.; "Computational signal processing with wavelets", Birkhäuser, p. 62, 1998.
- [7] MEYER, Y.; "Wavelets: Algorithms and Applications", *Society for Industrial and Applied Mathematics*, Philadelphia, pp. 13-31, 101-105, 1993.
- [8] KAISER, G. A .; "Friendly Guide to Wavelets", Birkhauser, Boston, pp. 44-45, 1994.
- [9] GROSSMANN, A.; MORLET, J.; "Decomposition of hardy functions into square intergrable wavelets of constant shape", *SIAM J. Math Anal.*, 15, 723-736., 1984.
- [10] RAO, R.M.; "Biorthogonal generalization of Meyer wavelets". Dept. of Electr. Eng., Rochester Inst. of Technol., v.2, New York, *Conference Record of the Thirty-First Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers*, pp.1240-1243, 1997.
- [11] DAUBECHIES, S. I.; *Ten lectures on wavelets*, SIAM, 1992.
- [12] MALLAT, S.G.; "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation", TPAMI, pp. 674-693, 1989.

[13] COIFMAN, R.R.; DONOHO, D. L.; "Time wavelet denoising, Wavelets and Statistics", Lect. Notes Stat., v.103, pp. 125-150, 1995.

[14] COIFMAN, R.R.; WICKERHAUSER, M.V.; "Entropy-based algorithms for best basis selection", *IEEE Trans. on Inf. Theory*, vol. 38, n.2, pp. 713-718, 1992.

[15] BILGUTAY, N. M.; KAYA, K.; MURTHY, R.; "Flaw detection in stainless steel samples using wavelet decomposition". In: Ultrasonics Symposium, Electrical & Computer Engineering Department, Drexel University, Philadelphia, PA 19104, 1271, 1994.

[16] OLIVEIRA FILHO, K. S.; **Fundamentos de Radiodiagnóstico por Imagem**. Instituto de Física. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br>>. Acesso em: 16 jul. 2007.

[17] WIKIPEDIA. Disponível em: <http://www.wikipedia.org/chantillonnage_de_nyquist-shannon.html>. Acesso em: 19 jul. 2007.

[18] PLANETMATH. Disponível em: <<http://www.planetmath.org/encyclopedia/paleywienertheorem.html>>. Acesso em: 20 jul. 2007.

[19] WIKIPEDIA. Disponível em: <<http://www.wikipedia.org/cauchy-schwartz.html>>. Acesso em: 23 jul. 2007.

[20] BADESVANT, C.; PERRIER, V.; PHILIPOVITCH, T.; *Wavelet spectra compared to Fourier spectra*. Chemometrics and Intelligent Laboratoire de Météorologie Dynamique. Laboratoire d'Analyse, Géométrie et Applications. 1-20.

[21] OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R.W.; *Digital Signal Processing*, New Jersey, Prentice Hall, 1975.

[22] CESAR JUNIOR, R. M. Disponível em: <<http://www.vision.ime.usp.br/~cesar/talks/fourierwavelets.html>>. Acesso em: 13 ago. 2007.

[23] WIKIPEDIA. Disponível em: <<http://www.wikipedia.org>>. Acesso em: 10 jul. 2007.

[24] MATHFIRE. Disponível em: <<http://www.mathfire.sites.uol.com.br/Sucessoes.html>>. Acesso em: 18 jul. 2007.

[25] CARLESON, L.; "Convergence and growth of partial sums of Fourier series", *Acta Math*, v. 116, pp. 135-157, 1966.

[26] ALBIS, V.; GALINDO, W. Z.; "Una introducción elemental a la teoría de las funciones zeta locales de Igusa". Universidad Nacional de Colombia. Universidad Autónoma de Bucaramanga. *Lecturas Matemáticas*, v.20, pp. 5-33, 1999.

[27] HUBBARD, B. ; *The world according to wavelets*, AK Peters, Wellesley. The French original version is titled Ondes et Ondelettes. La saga d'un outil mathématique, Pour la Science, (1996).

[28] COHEN, A.; DAUBECHIES, S. I.; FEAUVEAU, J.C.; "Biorthogonal basis of compactly supported wavelets", *Comm. Pure Appl. Math.* , v.45, pp. 485-560, 1992.

[29] COHEN, A.; *Wavelets and multiscale signal processing*, Chapman and Hall.,1995.

[30] TEIXEIRA, L. M.; *O uso da transformada wavelet contínua na detecção de complexo ponta-e-onda estudo de desempenho*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, CEFET/PR, Paraná, PR, Brasil, 2001.

[31] DAUBECHIES, S. I.; "Ten lectures on wavelets", *SIAM*, 1992.

[32] CHUI, C.K.; "Wavelets: a tutorial in theory and applications", *Academic Press*, 1992.

[33] CHUI, C.K.; (1992b), 'An introduction to wavelets', *Academic Press*, 1992.

[34] MISITI, M.; OPPENHEIM, G.; POGGI, J.M.; In : "Wavelet Toolbox User's Guide", Natick, MA: MathWorks, Inc., 1997.

[35] COIFMAN, R.R.; MEYER, Y.; WICKERHAUSER, M.V.; "Wavelet analysis and signal processing" , In: "Wavelets and their applications", *M.B. Ruskai et al.* (Eds.), pp. 153-178, *Jones and Bartlett*, 1992.

[36] MISITI, M.; OPPENHEIM, G.; POGGI, J.M.; "Ondelettes en statistique et traitement du signal", *Revue de Statistique Appliquée*, v. 41, n.4, pp. 33-43, 1993.

[37] MISITI, M.; OPPENHEIM, G.; POGGI, J.M.; "Analyse de signaux classiques par décomposition en ondelettes", *Revue de Statistique Appliquée*, v.41, n.4, pp. 5-32, 1993.

[38] MOHOLKAR, V.S.; HUITEMA, M.; REKVELD, S.; "Characterization of an ultrasonic system using wavelet transform", Chemical Engineering Science, *Warmoeskerken*, M.M.C.G, 57, 617-629, 2001.

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA

DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENADORIA DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA

DISSERTAÇÃO

APLICAÇÃO DE TRANSFORMADA WAVELET NO PROCESSAMENTO DE SINAIS
ULTRA-SÔNICOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS
AR-ÁGUA

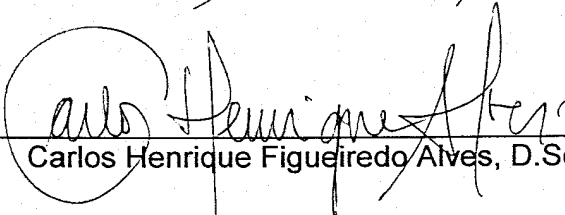
Wanderley Freitas Lemos

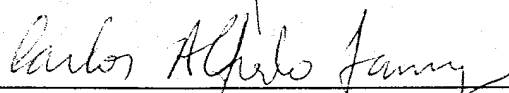
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM TECNOLOGIA

Data da defesa: 10/12/07

Aprovação:


Maurício Saldanha Motta, D.Sc.


Carlos Henrique Figueiredo Alves, D.Sc.


Carlos Alfredo Lamy, D.Sc.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)