

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL**

CÉSAR YUTAKA OFUCHI

**MEDIÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADE POR TÉCNICA
ULTRASSÔNICA UTILIZANDO O MÉTODO DA
AUTOCORRELAÇÃO ESTENDIDA E EQUIPAMENTO PARA
ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

TESE

**Curitiba
2016**

CÉSAR YUTAKA OFUCHI

**MEDIÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADE POR TÉCNICA
ULTRASSÔNICA UTILIZANDO O MÉTODO DA
AUTOCORRELAÇÃO ESTENDIDA E EQUIPAMENTO PARA
ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de “Doutor em ciências”- Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas

Orientador: Prof. Dr. Flávio Neves Júnior.

Co-orientador: Prof. Dr. Rigoberto Morales.

CURITIBA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

O33m
2016

Ofuchi, César Yutaka
Medição do perfil de velocidade por técnica ultrassônica utilizando o método da autocorrelação estendida e equipamentos para ensaios não destrutivos / César Yutaka Ofuchi.-- 2016.
165 f. : il. ; 30 cm.

Texto em português, com resumo em inglês
Disponível também via World Wide Web
Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2016
Bibliografia: f. 123-131

1. Doppler, Ultrassonografia. 2. Ultrassonografia. 3. Escoamento multifásico. 4. Dinâmica dos fluidos. 5. Visualização de fluxo. 6. Testes não-destrutivos. 7. Testes ultra-sônicos. 8. Engenharia elétrica – Teses. I. Neves Junior, Flávio. II. Melgarejo Morales, Rigoberto Eleazar. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD: Ed. 22 – 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Título da Tese Nº. _____

Medição do Perfil de Velocidade em Escoamentos por Técnica Ultrassônica Utilizando o Método da Autocorrelação Estendida e Equipamentos para Ensaios não Destrutivos.

por

César Yutaka Ofuchi

Orientador: Prof. Dr. Flávio Neves Junior (UTFPR)

Coorientador: Prof. Dr. Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales (UTFPR)

Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de DOUTOR EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 13:30h do dia 04 de novembro de 2016. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos doutores:

Prof. Dr. Flávio Neves Junior
(Presidente – UTFPR)

Prof. Dr. Erick de Moraes Franklin
(UNICAMP)

Prof. Dr. Eduardo Parente Ribeiro
(UFPR)

Prof^a. Dr^a. Lúcia Valéria Ramos de Arruda
(UTFPR)

Prof. Dr. Daniel Rodrigues Pipa
(UTFPR)

Visto da Coordenação:

Prof. Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

Dedico este trabalho a meus pais Nelson e
Marina e a minha esposa Katsuk

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a minha família e esposa, por todo carinho e apoio incondicional durante todo o desenvolvimento desta tese.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Flávio Neves Júnior e meu co-orientador Prof. Dr. Rigoberto Morales, pelo suporte e orientação durante todo o trabalho.

Aos professores membros da pós-graduação da UTFPR Marco José da Silva e Lúcia Valéria de Arruda pelo apoio, sugestões e discussões.

Ao colega de laboratório e professor, Fabio Coutinho pelas ideias, discussões, estudos e companheirismo na linha de pesquisa de ultrassom.

Aos professores Ricardo Carvalho da UNIFEI e Antônio Carlos Banwartt da UNICAMP e seus alunos Jorge Luiz Biazussi e José Luís Gonçalves pelo auxílio prestado em equipamentos e plantas experimentais.

Aos meus amigos Rafael Daciuk, Geraldo Trabaquini, Eduardo Nunes e Guilherme Schneider pelo companheirismo durante todos esses anos de trabalho no laboratório.

A todos os bolsistas que me auxiliaram diretamente neste trabalho e que orientei, Juliano Scholz, Raquel Rasia, Pauline Bostelmann e Guilherme Nabeyama.

Aos membros do NUEM Reinaldo Justiniano pelo auxílio na montagem dos testes experimentais e ao Henrique Stel pelas discussões sobre fluidodinâmica.

A todos os colegas dos laboratórios LASCA, NUEM e LASII que de alguma forma contribuíram com o trabalho.

À Petrobras e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) que por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o setor de Petróleo e Gás número 10 – PRH10/ANP/MCT auxiliaram nesse projeto.

“Feliz aquele que
transfere o que sabe e
aprende o que ensina.”
Cora Coralina

RESUMO

OFUCHI, César Yutaka, **Medição do perfil de velocidade em escoamentos por técnica ultrassônica utilizando o método da autocorrelação estendida e equipamento para ensaios não destrutivos**. 165 p. Tese de doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Curitiba, 2016.

O interesse na medição do perfil de velocidade na área de fluidodinâmica tem crescido nos últimos anos devido a evolução das técnicas de medição. Nesse contexto, a técnica ultrassônica tem se destacado por ser não intrusiva, não invasiva e funcionar mesmo em fluidos opacos. Neste trabalho foi investigado a técnica de ultrassom Doppler para medição de perfis de velocidade, utilizando equipamentos ultrassônicos para ensaios-não-destrutivos (END). Tais equipamentos são mais acessíveis do que equipamentos convencionais de medição de velocidade por ultrassom. Também foi proposto o uso da técnica de autocorrelação estendida (EAM), para medição de velocidades além do limite de Nyquist. Essa restrição existe na grande maioria dos medidores, que utilizam a técnica convencional de autocorrelação (ACM). O EAM combina o ACM com o método da correlação cruzada (CCM), outro estimador amplamente conhecido, mas que não é muito utilizado devido a seu alto custo computacional. Desta forma, o EAM consegue medir velocidades maiores com um custo computacional intermediário, que não é tão baixo quanto o ACM e nem tão alto quanto o CCM. Para adquirir e processar os dados obtidos, foi desenvolvido um sistema para aquisição e processamento dos sinais baseado na linguagem LabView. O pulsador ultrassônico END e os estimadores de velocidade por EAM, CCM e ACM foram validados medindo o perfil de velocidade em um cilindro girante, capaz de fornecer velocidades controladas de fácil solução analítica. Os resultados mostram erros médios quadráticos abaixo de 2%, validando o equipamento e a técnica. O EAM também mediu velocidades acima no limite de Nyquist com um desempenho computacional de 9 vezes maior do que o CCM. Na segunda parte deste trabalho, a técnica ultrassônica de medição de velocidade foi aplicada para medição de escoamentos multifásicos em tubulações, tema de grande interesse da indústria de petróleo e gás. Um escoamento vertical líquido-gás-sólido foi analisado com o mesmo equipamento END. Primeiramente, o perfil de velocidade do escoamento líquido-sólido em regime laminar, foi medido e validado utilizando um equipamento Coriolis como referência. Em seguida, foram realizados testes adicionando gás ao escoamento. As velocidades superficiais de líquido e gás foram variadas para gerar os padrões de escoamento tipo bolhas dispersas, intermitente e intermitente aerado. Os resultados foram comparados a imagens de uma filmadora de alta velocidade. Foram obtidos parâmetros como perfil de velocidade das bolhas dispersas, velocidade do filme de líquido e velocidade da mistura dependendo do padrão de escoamento analisado. Assim, a medição de velocidade por ultrassom Doppler, utilizando um equipamento de END, foi aplicado com sucesso em dois problemas de fluidodinâmica.

Palavras-chave: Ultrassom Doppler. Perfil de velocidade. Escoamentos multifásicos.

ABSTRACT

OFUCHI, César Yutaka, **Ultrasonic velocity profiler applied to flow measuring using an extended autocorrelation method and non-destructive systems**. 165 p. Doctoral thesis – Graduate Program in Electrical and Computer Engineering (CPGEI), Federal University of Technology (UTFPR). Curitiba, 2016.

Interest in knowing the instantaneous velocity profile in fluid dynamics has grown in recent years as new flow visualization techniques are improving. In this context, the ultrasonic Doppler velocity profiler (UVP) has desirable characteristics, as it is non-invasive, works with opaque liquids, and it is portable and easy to install if compared with other velocity profiler methods. In this work, the use of nondestructive ultrasonic devices in the UVP field is investigated. NDT systems are widely available and have lower cost if compared to traditional ultrasonic velocity profiler systems. The use of an extended autocorrelation method (EAM) for ultrasonic velocity estimation beyond Nyquist limit are also evaluated. The Nyquist limit causes a restriction on the maximum measurable velocity of the traditional autocorrelation method (ACM), present in most of ultrasonic velocity profiler systems. EAM combines the ACM technique with cross-correlation method (CCM) which is a well-established velocity estimator that does not suffer with Nyquist limit. However, the technique has a high computational cost that limits real time applications. EAM has the advantage of measure velocities beyond the Nyquist limit but with a lower computational cost than CCM. To evaluate the NDT device and the velocity estimation techniques ACM, CCM and EAM, a data acquisition system and a signal-processing unit based on LabView language were developed. The velocity profile of a rotating cylinder was used to validate all measurements. The techniques ACM, CCM and EAM successfully measured velocities within Nyquist limit with less than 2% deviation, validating the NDT system. EAM also measured velocities beyond Nyquist limit with a computational performance 9 times faster than CCM. The ultrasonic technique was also applied to measure the velocity profile of a multiphase flow in a pipeline, which are of great interest in oil and gas industry. Tests within a multiphase flow composed by different combinations of oil/sand/nylon-particles and gas were conducted in a vertical rig. A high-speed camera was used to validate the measurements. First the ultrasonic velocity profile measured was validated in a liquid-solid flow by using a Coriolis flowmeter as a reference. Next, superficial liquid and gas velocity were controlled to obtain different flow patterns such as bubbly flow and slug flow. The technique measured the bubbles velocity, the mixture velocity and the liquid film velocity depending on the flow pattern. Finally, the ultrasonic NDT system was successfully applied to investigate two different fluid engineering problems.

Keywords: Ultrasound Doppler. Velocity Profile. Multiphase flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Medição no domínio do tempo do fluxo sanguíneo em um sinal que excede o limite da técnica Doppler convencional (gráficos em cima). O gráfico de baixo mostra o pico da função de correlação cruzada para obter a distância entre sinais (Bonnefous e Pesque, 1986).	27
Figura 2.2. O espectro de velocidade é obtido pela soma de sinais RF ao longo do tempo e espaço. O espectro é mostrado do lado direito (Torp e Kristoffersen, 1995).....	28
Figura 2.3. Esquema do método <i>staggered</i> PRT/PRF. A autocorrelação R1 é calculada no período T1 e a autocorrelação R2 é calculada para o período T2. A verdadeira fase é obtida pela diferença das fases encontradas por R1 e R2 (Sirmans, 1976).....	28
Figura 2.4. Experimento realizado por Takeda (1986). A velocidade de um escoamento monofásico água e partículas de Al ₂ O ₃ foi medido.....	29
Figura 2.5. Experimento realizado por Ouriev (2003) para medição em tempo real da reometria do chocolate. (a) Aparato experimental para medição da velocidade por ultrassom e o diferencial de pressão para o cálculo de taxa de cisalhamento, tensão de cisalhamento e por fim a viscosidade do fluido. (b) Comparação entre a reometria em tempo real proposta e um reometro off-line.	30
Figura 2.6. Experimento realizado por Yanagisawa (2010) para medição da temperatura e da velocidade do escoamento metal líquido (Galium). O estudo teve como objetivo avaliar a convecção térmica do fluido devido a campos eletromagnéticos.	31
Figura 2.7. Experimento realizado por Tezuka (2008) para medição do perfil de velocidade em tubos largos em uma usina hidrelétrica.	31
Figura 2.8. Experimento realizado por Abda <i>et al.</i> (2008) para medição do perfil de velocidade em canais abertos. (a) Canal de saída de esgoto. (b) Esquemático de medição.....	31
Figura 2.9. – (a) Ultrassom modo pulsado, em que existe um período de tempo entre pulsos de T _{prf} . (b) modo contínuo, em que o transdutor é constantemente excitado para geração de uma onda contínua.....	32
Figura 2.10. – Detecção da velocidade no modo ultrassom pulsado.....	33
Figura 2.11. – Representação da diferença de fase.....	34
Figura 2.12. – Representação polar das informações em fase e quadratura de uma onda.	35
Figura 2.13. – Combinação dos sinais reais e imaginários que são defasados de 90° para determinar se a frequência é positiva ou negativa. No exemplo mostrado a frequência é positiva.	36
Figura 2.14. – Esquema de um <i>hardware</i> para demodulação complexa do sinal.	36
Figura 2.15. – Esquemático do volume de medição para o cálculo da velocidade.	37
Figura 2.16. – Tamanho dos refletores em relação ao volume de medição. (a) O refletor é muito pequeno, causando ecos de baixa relação sinal ruído. (b) O refletor tem a medida entre ¼ e ½ do comprimento de onda da frequência básica do transdutor, ideal para as medidas. (c) O refletor tem medidas maiores do que o recomendado, o que aumenta a probabilidade de múltiplas reflexões entre eles gerando distorções na medida. (d) O refletor é maior do que o diâmetro ativo do transdutor, nesse caso o eco da partícula é como o de uma parede, praticamente não é possível medir duas emissões sucessivas e calcular a velocidade corretamente.	38

Figura 2.17. – Fluxo de partículas. (a) Medição de um número adequado de “volumes de medição” dado uma concentração, uma velocidade e um intervalo de tempo. (b) Apesar da redução na concentração ($c/2$), o aumento na velocidade ($2v$) também aumenta o número de “volumes de medição” adquiridos no mesmo intervalo de tempo de (a).	39
Figura 2.18. – Relação entre a velocidade do escoamento e a velocidade medida por ultrassom. (a) Ângulo grande. (b) Ângulo pequeno.	40
Figura 2.19. – Exemplo de A-Scan.....	41
Figura 2.20. – Exemplo de B-Scan.....	41
Figura 2.21. – Exemplo de M-Scan de um escoamento bifásico horizontal (transdutor emitindo pulsos de baixo para cima) comparado a uma imagem adquirida por uma câmera de alta velocidade.....	42
Figura 2.22. – O gráfico superior é um M-scan e o inferior um perfil de velocidade de um escoamento bifásico horizontal pistonado.....	43
Figura 3.1. – Aplicação do TGC nos dados de ultrassom.	44
Figura 3.2. – Espectro de frequência da parede e do escoamento.	45
Figura 3.3. – M-Scan dos dados de ultrassom mostrando o resultado obtido pelo filtro passa altas para retirar os ecos estacionários. (a) Sinal original. Uma múltipla reflexão na posição 11mm pode gerar velocidades próximas de zero. (b) Sinal com filtro de eco estacionário. A múltipla reflexão foi removida.	47
Figura 3.4. – Esquemático da técnica de correlação cruzada. As amostras são segmentadas para obter vetores velocidade em diferentes profundidades.....	49
Figura 3.5. – Transdutores da Olympus de com diferentes bandas de frequência. (a) Acuscan, de banda estreita e resposta temporal com vários ciclos de onda. (b) Videoscan, de banda larga e um pulso curto de poucos ciclos de onda. Fonte: (OLYMPUS, 2014a).....	51
Figura 3.6. – Desenho esquemático da técnica de Autocorrelação Estendida.	52
Figura 3.7. – Exemplo de filtro de mediana aplicado.....	53
Figura 4.1. – Resposta de um pulsador tipo onda quadrada ajustado para transdutores de frequências de 2,25, 4, 10 e 15 MHz. (a) Onda quadrada gerada observada no tempo. (b) Espectro de frequência.	55
Figura 4.2. – Sinal de ultrassom de um eco de parede.	56
Figura 4.3. – Diagramas em blocos do <i>software</i>	56
Figura 4.4. – Tela do <i>software</i> desenvolvido.....	57
Figura 4.5. – Perfil de velocidade medida no cilindro girante.	58
Figura 4.6. – Esquemático do aparato experimental para medição de velocidade em um cilindro giratório.	58
Figura 4.7. – Perfil de Velocidade para um conjunto de velocidades medidos por ACM, CCM e EAM. (a) Velocidade de 167 mm/s, abaixo do limite de Nyquist. (b) Velocidade de 202 mm/s, abaixo do limite de Nyquist. (c) Velocidade de 239 mm/s, acima do limite de Nyquist. (d) Velocidade de 263 mm/s, acima do limite de Nyquist.....	60
Figura 4.8. – Comparação entre a fase encontrada pelo ACM e o EAM.	61
Figura 4.9. – Perfil de velocidade para dados sub amostrados por um fator de três. (a) Velocidade do cilindro de 167 mm/s, acima de duas vezes o limite de Nyquist. (b) Velocidade do cilindro de 239 mm/s, acima de três vezes o limite de Nyquist.	63
Figura 4.10. – Perfil de velocidade acima de 7 vezes o limite de Nyquist.....	63

Figura 4.11. – Perfis de velocidade em diferentes taxas de amostragem. (a) 40 MS/s (b) 30 MS/s (c) 20 MS/s (a) 10 MS/s.....	65
Figura 4.12. – Perfis de velocidade em diferentes taxas de amostragem. (a) 8 MS/s (b) 6 MS/s.....	66
Figura 5.1. Reservatório de petróleo com gás no topo e óleo em baixo.....	67
Figura 5.2. Padrão de escoamento para tubulação horizontal. Fonte: Adaptado de Shoham(2006).	68
Figura 5.3. Padrão de escoamento para tubulação vertical. Fonte: Adaptado de Shoham (2006).	69
Figura 5.4. Mapa de padrões bifásico líquido-gás em tubulação horizontal.	70
Figura 5.5. Mapa de padrões bifásicos líquido-gás em tubulação vertical.....	71
Figura 5.6. MMFs aplicado a distribuição da produção.	71
Figura 5.7. Medição da velocidade por correlação cruzada (PIETROFIORENTINI, 2014). ..	72
Figura 5.8. Medição da velocidade do escoamento por rastreamento de vórtices.	73
Figura 5.9. Medição da velocidade por variação da pressão.	74
Figura 5.10. Princípio de medição do medidor Coriolis.....	74
Figura 5.11. Princípio de medição do PIV (LA VISION, 2016).....	75
Figura 5.12. Correlação cruzada para calcular o vetor velocidade (LA VISION, 2016).	75
Figura 5.13. Esquemático da técnica LDV. Um feixe de laser é dividido por um prisma. Uma lente foca os feixes coerentes para um único ponto (volume de medição) criando um sistema de franjas com um espaçamento conhecido d . A partícula ao passar pelas franjas gera um sinal com período T (frequência Doppler), possibilitando o cálculo da velocidade v (CZARSKE, 2006).	77
Figura 5.14. Sondas para anemometria de fio quente. (a) Fotografia de uma sonda tipo “X”. (b) Tipos de sondas. Fonte: Catálogo de sondas da TSI (2016).	78
Figura 5.15. Medição da velocidade do gás (U_G) e da velocidade do líquido (U_L)	79
Figura 5.16. PDF das velocidades obtidas utilizando transdutores de diâmetros de 2.5, 5 e 10 mm.	80
Figura 5.17. Transdutor de duas frequências proposto por Murakawa, Kikura e Aritomi (2005; 2004).	80
Figura 5.18. (a) Aparato experimental. (b) Perfil de velocidade da bolha alongada.	81
Figura 5.19. (a) Linhas de medição para detectar a bolha alongada (b) visão lateral da montagem (c) visão frontal da montagem.	81
Figura 5.20. Configurações testadas para medição da fração de vazio.	82
Figura 5.21. Aparato mecânico desenvolvido com suporte a múltiplos transdutores.	82
Figura 5.22. (a) Linhas de medição para detectar a bolha alongada (b) visão lateral da montagem (c) visão frontal da montagem.	83
Figura 6.1. Circuito de teste para escoamentos multifásicos (LRF-UNIFEI).	84
Figura 6.2. (a) Reservatórios do circuito experimental, (b) tanque de suspensão e (c) bombas de cavidade progressiva.....	86
Figura 6.3. (a) Ponto de injeção de gás no escoamento e (b) Sistema de controle e medição das vazões de líquido.	86
Figura 6.4. (a) Seção de testes entre as válvulas de fechamento rápido e (b) montagem do transdutor na seção de testes angulado a 5 graus.	87

Figura 6.5. Sistema de aquisição da National Instruments.....	87
Figura 6.6. Pulsador e receptor de ondas ultrassônicas Olympus modelo 5077PR.....	88
Figura 6.7. Transdutor de ultrassom Met-flow de 4 MHz.....	88
Figura 6.8. Câmera de alta velocidade RedLake MotionPro X4.....	89
Figura 6.9. Monitoramento da trajetória de partículas no escoamento.	89
Figura 6.10. Conversão de pixels em milímetros.	89
Figura 6.11. Espectro de atenuação para esferas de vidro de diversos tamanhos. Fonte: (DUKHIN; GOETZ, 2002).	92
Figura 6.12. Comparação entre o perfil de velocidade obtido pela técnica ultrassônica e pelo medidor Coriolis, utilizando o perfil teórico/analítico do escoamento laminar.	93
Figura 6.13. Velocidade média da série temporal e o perfil de velocidade espaço temporal do escoamento óleo e partículas.	94
Figura 6.14. PDF das velocidades medidas por ultrassom e de um perfil de velocidades laminar teórico.....	95
Figura 6.15. Série temporal de velocidade média e o perfil de velocidade espaço temporal do escoamento óleo, areia e partículas.	96
Figura 6.16. Comparação entre gráficos de perfil de velocidade obtidos por ultrassom e pelo medidor Coriolis (perfil teórico/analítico) para 0,83% de areia.....	97
Figura 6.17. Comparação entre as velocidades medidas pelas técnicas de ultrassom e Coriolis e suas respectivas incertezas.....	97
Figura 6.18. Evolução dos padrões de escoamentos na tubulação de uma polegada: (a) bolhas dispersas. (b) intermitente. (c) intermitente aerado. (d) intermitente/anular.....	99
Figura 6.19. Imagem, M-Scan e perfil de velocidade de um trecho do escoamento óleo e areia no padrão bolhas dispersas.	100
Figura 6.20. Velocidade média e o perfil de velocidade ao longo do tempo para um escoamento padrão bolhas dispersas.	101
Figura 6.21. Perfis de velocidade medidas por ultrassom, em comparação com o perfil laminar teórico a partir da velocidade da mistura e velocidades das bolhas medidas pelas imagens.....	102
Figura 6.22. PDF das velocidades medidas por ultrassom e a PDF para um perfil laminar ideal.	103
Figura 6.23. Comparação entre as PDFs dos perfis de velocidade turbulento e laminar.	103
Figura 6.24. Imagem, Ecos de ultrassom e perfil de velocidade em um trecho do escoamento óleo e areia no padrão intermitente de bolhas alongadas.	105
Figura 6.25 Reconhecimento de bolhas alongadas pela série temporal de distância entre o eco da parede e o maior eco subsequente. (a) Perfil de amplitude dos ecos sobreposta pela série temporal de distância. (b) Perfil de velocidade sobreposto pela série temporal de distância.....	106
Figura 6.26. Movimento da partícula para indicar o sentido da velocidade.....	107
Figura 6.27. Relação entre as velocidades medidas por ultrassom e a passagem da bolha alongada. (a) Erros devido ao formato da bolha alongada. (b) Erros devido ao vórtice logo após a passagem da bolha alongada.	107
Figura 6.28. Imagem, M-scan e perfil de velocidade da região de bolhas dispersas do escoamento no padrão intermitente de bolhas alongadas.....	108

Figura 6.29. Comparação entre o perfil de velocidade medida por ultrassom (original e apenas bolhas dispersas), o perfil de velocidade de um escoamento laminar teórico baseado na velocidade média da mistura e a velocidade das bolhas medidas por imagem.	109
Figura 6.30. Comparação entre o perfil de velocidade medida por ultrassom (original e apenas bolhas dispersas), o perfil de velocidade de um escoamento laminar teórico baseado na velocidade média da mistura e a velocidade das bolhas medidas por imagem. (a) PDF normalizada pelo valor máximo. (b) Perfil de velocidade.	110
Figura 6.31. Imagem, M-Scan e velocidade de um escoamento óleo e areia no padrão intermitente aerado.	111
Figura 6.32. Velocidade média e o perfil de velocidade ao longo do tempo para um escoamento padrão intermitente aerado.	112
Figura 6.33. Velocidade média medida no trecho de bolhas dispersas do escoamento pistonado instável.	112
Figura 6.34. PDFs das velocidades no padrão intermitente aerado, medidas por ultrassom (original e o trecho de bolhas dispersas) e de um perfil teórico para um escoamento laminar.	113
Figura 6.35. Imagem, ecos de ultrassom e perfil de velocidade do escoamento óleo e areia no padrão intermitente/anular.	114
Figura 6.36. Imagem, M-scan e perfil de velocidade do escoamento óleo e areia no padrão intermitente/anular (apenas a bolha alongada).	115
Figura 6.37. Perfil de velocidade (a) Ultrassom (b) Câmera.	116
Figura 6.38. Velocidade média, perfil de velocidade e PDFs das velocidades para um escoamento óleo, partículas e areia próximas a parede da tubulação (0-1,5mm). (a) Escoamento sem gás. (b) Escoamento no padrão bolhas dispersas. (c) Escoamento no padrão intermitente. (d) Escoamento no padrão intermitente/anular.	118
Figura B.1. Deslocamento das partículas do meio devido a uma perturbação acústica relativo a um determinado instante de tempo. (a) Onda Longitudinal. (b) Onda Transversal.	136
Figura B.2. Comportamento da onda em interfaces.	139
Figura B.3. - Comportamento do campo acústico. (a) Ilustração do Campo Próximo e do Campo Distante. (b) Exemplo de campo acústico de um transdutor de 2,25 MHz.	142
Figura B.4. – Abertura do feixe ultrassônico.	143
Figura B.5. Definição – Distribuição da amplitude da pressão acústica.	143
Figura B.6. – Pulsos de ultrassom. (a) pulso de um ciclo. (b) pulso de um ciclo com comprimento de onda maior. (c) pulso de 4 ciclos.	144
Figura B.7.– Transdutores de banda de frequência diferentes.	144
Figura C.1. Separadores de teste.	146
Figura C.2. Operação no Campo de Jubarte conforme planejamento em 2007.	147
Figura C.3. Layout para testes de poços utilizando MMFs.	147
Figura C.4. MMFs aplicado a distribuição da produção.	148
Figura C.5. MMFs aplicado a distribuição da produção.	148
Figura C.6. Diferentes geometrias de eletrodos aplicados a MMFs. (a) Abbon As (ABBON AS, 2011). (b) Roxar Zector Technology (EMERSON/ROXAR, 2014)(c) Pietro Fiorentini (PIETROFIORENTINI, 2012).	150
Figura C.7. Sensor Wire-Mesh comercializado pela empresa Teletronic GmbH.	150
Figura C.8. Sensor de fração de água em óleo da Weatherford Red Eye®.	151

Figura C.9. Medição da fração de fase por espectroscopia de micro-ondas (3D Broadband® da FMC/MPM).....	152
Figura C.10. MMF com separação parcial de fase.....	153
Figura C.11. MMF da (WEATHERFORD, 2014b).....	153
Figura C.12. MMFs em escoamento homogêneo.....	154
Figura C.13. Homogeneizador do medidor Mixmeter da Jiskoot.....	154
Figura C.14. MMFs aplicado a distribuição da produção.....	154
Figura C.15. Medidor Multifásico de medição direta das 3 fases.....	155
Figura C.16. Medidor Multifásico de medição indireta das 3 fases Esmer.....	156
Figura C.17. Medidor Multifásico da Medeng.....	156
Figura C.18. MPFM50 da AgarCorp.....	157
Figura D.1. <i>Software</i> para calcular velocidade por imagem (seleção do ponto superior esquerdo).....	160
Figura D.2. <i>Software</i> para calcular velocidade por imagem (seleção do ponto inferior direito).....	161
Figura D.3. <i>Software</i> para calcular velocidade por imagem (ROI selecionada).....	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Aplicações diversas da técnica de ultrassom Doppler na área de estudos fluidodinâmicos.	30
Tabela 4.1. Resumo das velocidades encontradas	61
Tabela 4.2. Esforço computacional dos estimadores de velocidade.....	62
Tabela 4.3. Desvio médio quadrático para os estimadores EAM e CCM para velocidades acima do limite de Nyquist. As cores indicam o número de vezes que a velocidade ultrapassa o limite de Nyquist.	64
Tabela 5.1. Resumo comparativo dos padrões definidos na literatura para tubulações horizontais.	69
Tabela 5.2. Identificação e descrição dos padrões de escoamento bifásico líquido-gás em dutos verticais.	70
Tabela 6.1. Comparação entre as velocidades medidas pelas técnicas de ultrassom e Coriolis e suas respectivas incertezas.	97
Tabela 6.2. Condições experimentais do escoamento líquido-sólido-gás.	99
Tabela 6.3. Resumo dos parâmetros mensuráveis nos padrões de escoamento estudados. ...	119
Tabela B.1. Propriedades acústicas de alguns materiais (OLYMPUS, 2014a).....	138
Tabela B.2. Relações úteis em decibéis.....	141
Tabela C.1. MMFs comerciais disponíveis e suas principais técnicas.	158
Tabela E1. Tabela de incertezas para a medição de velocidade por imagem.....	162
Tabela E2. Tabela de incertezas para a medição de velocidade por ultrassom.	162

SIMBOLOGIA

Letras Latinas

<i>A</i>	Área da seção transversal do duto	m^2
<i>a</i>	Raio da partícula	M
<i>c</i>	Velocidade de propagação da onda acústica	$m \cdot s^{-1}$
<i>cp</i>	Calor específico a pressão constante	$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$
<i>d</i>	Distância	M
<i>d_{max}</i>	Distância máxima mensurável	M
<i>f_{prf}</i>	Frequência de repetição de pulsos	Hz
<i>f₀</i>	Frequência central do transdutor	Hz
FVG	Fração volumétrica de gás	%
FVA	Fração volumétrica de água	%
FVO	Fração volumétrica de óleo	%
<i>g</i>	Fase gasosa	-
<i>H</i>	Função de transferência de um filtro	
<i>I</i>	Intensidade acústica	$W \cdot m^{-2}$
<i>J</i>	Velocidade da mistura	$m \cdot s^{-1}$
<i>J_L</i>	Velocidade superficial do líquido	$m \cdot s^{-1}$
<i>J_G</i>	Velocidade superficial do gás	$m \cdot s^{-1}$
<i>K</i>	Constante de mola	$N \cdot m^{-1}$
<i>k</i>	Número de onda	m^{-1}
<i>k</i>	Constante de propagação	-
<i>L</i>	Comprimento	m
<i>l</i>	Fase líquida	-
<i>m</i>	Vazão mássica do fluido	$kg \cdot s^{-1}$
<i>N</i>	Distância linear do campo acústico próximo	m
<i>N_{am}</i>	Número de amostras	-
<i>N_l</i>	Número de linhas ou pulsos	-
<i>N_{mult}</i>	Número de multiplicações	-
<i>N_p</i>	Número de possibilidades	-
<i>N_{som}</i>	Número de somas	-
<i>N_{ts}</i>	Número de amostras de deslocamento temporal	-
<i>p</i>	Pressão instantânea	Pa
<i>p</i>	Pressão acústica	Pa
<i>pix</i>	pixels	-
<i>Q</i>	Vazão volumétrica	$m^3 \cdot s^{-1}$
<i>R</i>	Autocorrelação	-
<i>R₁₂</i>	Correlação cruzada	-
<i>R</i>	Raio interno da tubulação	M
<i>r_s</i>	Fase de um sinal	-
<i>r_c*</i>	Fase de um sinal complexo conjugado	-

RA	Resolução Axial	m
Re	Número de Reynolds	-
SNR	Relação Sinal Ruído	dB
S_{rms}	Desvio quadrático médio normalizado	%
T	Índice de transmissão	-
TGC	<i>Time Gain Compensation</i>	-
tt	Tempo de trânsito	μs
T_{prf}	Tempo entre repetição de pulsos	s
t_s	Deslocamento de tempo	s
U	Velocidade superficial da fase no escoamento	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
u	Vetor velocidade	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
uc	Incerteza combinada	-
V	Volts	-
V_{avg}	Velocidade média	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
V_b	Velocidade das bolhas	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
V_m	Velocidade média	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
v	Velocidade	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
v_c	Velocidade do cilindro	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
v_{max}	Máxima velocidade mensurável	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
v_{min}	Mínima velocidade mensurável	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
v_r	Velocidade axial	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
v_{us}	Velocidade por ultrassom	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
v_x	Velocidade na linha do campo acústico	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
W	Watts	-
Z	Impedância acústica	$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$
z	Posição no eixo das abcissas ou distância linear percorrida pela onda	m

Letras Gregas

α	Ângulo de abertura do feixe do transdutor ultrassônico	-
γ	Fração de água	-
θ	Ângulo entre transdutor e o escoamento	$^\circ$
λ	Comprimento de onda	m
μ	Viscosidade dinâmica	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
ν	Velocidade instantânea da partícula de fluido	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
ρ	Densidade instantânea	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ	Massa específica	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ_0	Densidade média	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
σ	Desvio padrão	-
τ	Período de cada ciclo	s
φ	Fase da onda ultrassônica	rad
Φ	Ângulo defase	rad
ω	Velocidade angular	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$

Siglas e Abreviaturas

ACM	Método da autocorrelação
CCM	Método por correlação cruzada
CENPES	Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello
EAM	Método da autocorrelação estendida
END	Ensaios não destrutivos
GUI	<i>Graphic User Interface</i>
GUM	Guia para expressão da incerteza de medição
HWA	<i>Hot Wire Anemometry</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LASCA	Laboratório de Automação e Sistemas de Controle Avançado
LASII	<i>Laboratory of Sensors and Industrial Instrumentation</i>
LDA	<i>Laser Doppler Anemometry</i>
LDV	<i>Laser Doppler Velocimetry</i>
LRF	Laboratório de Refrigeração e Ar Condicionado
MMF	Medidor Multifásico
NDT	<i>Non Destructive Testing</i>
NUEM	Núcleo de escoamentos multifásicos
PDF	Função densidade de probabilidade
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i>
PRF	Frequência de repetição de pulsos
PRF	Tempo de repetição de pulsos
PXI	<i>PCI eXtensions for Instrumentation</i>
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>
ROI	<i>Region of Interest</i>
RPM	Revoluções por minuto
SONAR	<i>Sound Navigation and Ranging</i>
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UDV	<i>Ultrasonic Doppler Velocimetry</i>
UVP	<i>Ultrasonic Velocity Profiler</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	22
1.1 OBJETIVOS.....	23
1.2 ESTRUTURA DA TESE	24
2 MEDIÇÃO DE PERFIL DE VELOCIDADE POR ULTRASSOM.....	26
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA TÉCNICA ULTRASSÔNICA DOPPLER	26
2.2 APLICAÇÕES DA TÉCNICA ULTRASSÔNICA DOPPLER NA ÁREA DE FLUIDODINÂMICA	29
2.3 FUNDAMENTOS DE ULTRASSOM NO MODO DOPPLER.....	32
2.3.1 Sinal em fase e quadratura	35
2.3.2 Volume de Medição	37
2.3.3 Refletores	37
2.3.4 Ângulo de Medição	39
2.4 APRESENTAÇÃO DOS DADOS DE ULTRASSOM	40
2.4.1 A-Scan.....	40
2.4.2 B-Scan	41
2.4.3 M-Scan	42
2.4.4 Perfil de Velocidade.....	42
3 TÉCNICAS PARA PROCESSAMENTO DE DOPPLER ULTRASSÔNICO	44
3.1 PRÉ-PROCESSAMENTO	44
3.1.1 Compensação de ganho de tempo	44
3.1.2 Filtro de ecos estacionários	45
3.2 ESTIMADORES DE VELOCIDADE	47
3.2.1 Autocorrelação	47
3.2.2 Correlação Cruzada.....	49
3.2.3 Autocorrelação estendida	51
3.3 PÓS-PROCESSAMENTO	53
4 DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO E VALIDAÇÃO DA TÉCNICA DA AUTOCORRELAÇÃO ESTENDIDA UTILIZANDO PULSADORES DE END	54
4.1 PULSADOR PARA ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS APLICADOS A MEDIÇÃO DE VELOCIDADE	54
4.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO EM TEMPO REAL DE DADOS ULTRASSÔNICOS	56
4.3 VALIDAÇÃO DA TÉCNICA DE AUTOCORRELAÇÃO ESTENDIDA EM UM CILINDRO GIRANTE	57
4.3.1 Metodologia de medição	59
4.3.2 Resultados	60
4.3.3 Esforço Computacional.....	61
4.3.4 Velocidade máxima mensurável	62
4.3.5 Taxa mínima de amostragem de dados	64

5 MEDIÇÃO DA VELOCIDADE EM ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS	67
5.1 OS ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS	67
5.2 TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE VELOCIDADE EM MEDIDORES MULTIFÁSICOS	71
5.2.1 Correlação cruzada de sinais	72
5.2.2 Rastreamento de vórtices turbulentos por um vetor de sensores	73
5.2.3 Efeito Doppler	73
5.2.4 Diferencial da pressão/Venturi	73
5.2.5 Coriolis	74
5.3 TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE VETORES OU CAMPOS DE VELOCIDADE..	74
5.3.1 Velocimetria por imagem de partículas (PIV)	75
5.3.2 Velocimetria por laser doppler	76
5.3.3 Anemometria a fio quente	77
5.3.4 Ultrassom Doppler	78
5.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICAS DAS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS UTILIZANDO ULTRASSOM DOPPLER.....	79
6 MEDIÇÃO DA VELOCIDADE EM ESCOAMENTOS VERTICAIS UTILIZANDO TÉCNICA ULTRASSÔNICA DOPPLER.....	84
6.1 BANCADA EXPERIMENTAL.....	84
6.2 INSTRUMENTAÇÃO	87
6.2.1 Instrumentação Ultrassônica	87
6.2.2 Câmera de alta velocidade	88
6.3 INCERTEZAS DE MEDIÇÃO.....	90
6.3.1 Incerteza de medição da câmera de alta velocidade.....	90
6.3.2 Incertezas de medição do estimador ultrassônico de velocidade	90
6.4 METODOLOGIA.....	91
6.5 RESULTADOS PARA O ESCOAMENTO LÍQUIDO-SÓLIDO.....	93
6.5.1 escoamento óleo-poliamida	93
6.5.2 escoamento óleo-poliamida-areia	95
6.6 RESULTADOS PARA O ESCOAMENTO LÍQUIDO-SÓLIDO-GÁS	98
6.6.1 Padrão bolhas dispersas.....	99
6.6.2 Padrão Intermitente	104
6.6.3 Padrão Intermitente Aerado	110
6.6.4 Padrão Intermitente/Anular	114
6.7 RESUMO DOS RESULTADOS	118
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	120
7.1 PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS	120
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	122
7.2.1 Novas aplicações	122
7.2.2 Medição multifásica	122
REFERÊNCIAS	123
APÊNDICE A	132

A. LISTA DE PUBLICAÇÕES	132
A.1 LISTA DE PUBLICAÇÕES CONTIDAS NESTE TRABALHO	132
A.2 LISTA DE PUBLICAÇÕES NÃO RELACIONADAS DIRETAMENTE	132
A.3 ORIENTAÇÕES DE TRABALHOS	132
A.4 PREMIAÇÕES	133
APÊNDICE B.....	134
B. FUNDAMENTOS DE ULTRASSOM.....	134
B.1 HISTÓRICO	134
B.2 CONCEITOS BÁSICOS	135
B.3 TRANSDUTORES	141
APÊNDICE C	146
C. MEDIDORES MULTIFÁSICOS NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA.....	146
C.1 APLICAÇÕES DE MEDIDORES MULTIFÁSICOS	146
C.2 DESCRIÇÃO DE TÉCNICAS E PRINCÍPIOS FÍSICOS DE MEDIDORES MULTIFÁSICOS	148
C.2.1 MEDIÇÃO DA FRAÇÃO DE FASE.....	149
C.3 CONFIGURAÇÃO DE MEDIDORES MULTIFÁSICOS	152
C.3.1 ESCOAMENTO HOMOGÊNEO COM SEPARAÇÃO PARCIAL DE FASES	152
C.3.2 ESCOAMENTO HOMOGÊNEO SEM A SEPARAÇÃO DE FASES	154
C.3.3 ESCOAMENTO NÃO-HOMOGÊNEO	154
C.4 GÁS UMIDO (WET GAS).....	157
C.5 RESUMO DOS MEDIDORES COMERCIAIS PESQUISADOS.....	158
APÊNDICE D	160
D. SOFTWARE PARA MEDIÇÃO DE VELOCIDADE POR IMAGEM.....	160
APÊNDICE E.....	162
E. INCERTEZAS DE MEDIÇÃO.....	162
APÊNDICE F.....	163
F. DIGRAMA EM BLOCOS LABVIEW.....	163
APÊNDICE G	164
G. PSEUDOCÓDIGO PARA OS ESTIMADORES DE VELOCIDADE AVALIADOS	
164	

1 INTRODUÇÃO

A fluidodinâmica é uma ciência aplicada que se interessa no movimento dos líquidos. Entre as variáveis de maior importância desse campo, estão os vetores de velocidade, que são estudados e utilizados em diversas áreas. Uma delas é a de escoamentos multifásicos, presente em várias atividades industriais, como em reatores nucleares, sistemas de refrigeração e na exploração e produção de petróleo e gás. Um melhor entendimento desse fenômeno pode ajudar no desenvolvimento de ferramentas que possibilitem o aprimoramento dos processos.

Nas últimas décadas, surgiram novos métodos que possibilitam a medição detalhada desses vetores, como o *Particle Image Velocimetry* (PIV) e o Laser Doppler Velocimeter (LDV). Ambas utilizam princípios ópticos que, por sua vez, são limitados a aplicações em meios e fluidos transparentes. Outra técnica que tem se estabelecido para a medição de perfis de velocidade é o ultrassom Doppler, também conhecido como *Ultrasonic Velocity Profiler* (UVP) ou *Ultrasonic Doppler Velocimetry* (UDV). O método possui características desejáveis para a indústria, como funcionar com líquidos opacos, ser não intrusivo e não invasivo, operar em tempo real e ser de fácil instalação se comparado a outros instrumentos para medição de perfil de velocidade.

Atualmente existem poucos fabricantes de equipamentos ultrassônicos para medição de perfil de velocidade com foco em problemas de fluidodinâmica. O mercado é recente e também muito específico, tornando os sistemas caros e difíceis de se encontrar. No Brasil, por exemplo, não existem representantes oficiais de nenhum equipamento desse tipo. Equipamentos médicos de medição de velocidade são amplamente utilizados, porém têm custos muito elevados e não são apropriados para esse tipo de aplicação. Uma alternativa a esses sistemas de medição são os equipamentos ultrassônicos para ensaios não destrutivos (END). A área de ultrassom END já existe desde os anos 50 para inspeção de peças em todo o mundo, e, portanto, é largamente difundida.

Equipamentos de ultrassom para END têm por objetivo avaliar imperfeições em materiais. Nesse cenário é ideal que sejam usados pulsos curtos (banda larga) para se obter uma melhor resolução espacial. Porém, o método mais utilizado para calcular a velocidade por ultrassom utiliza autocorrelação (ACM) para medir o desvio de fase. A técnica necessita de pulsos mais longos para medir com mais acurácia o desvio de frequência (muitas vezes chamado de efeito Doppler). Essa pode ser uma das razões de não haver aplicações na área de medição de perfil de velocidade utilizando equipamentos END. Desta forma, avaliar o uso de

um equipamento de ultrassom END para medição de perfis de velocidade é de grande interesse para a área, pois possibilita o acesso ao UVP utilizando menos recursos.

O ACM é muito utilizado por ser de fácil implementação e computacionalmente eficiente (Lai e Torp, 1997). A técnica é baseada na medição da diferença de fase entre ecos consecutivos para estimar a velocidade. A desvantagem dessa abordagem é a limitação em medir velocidades altas, devido ao efeito de *aliasing* na medição da diferença de fase. Uma técnica muito conhecida na área, que não possui essa restrição de velocidade, é o método por correlação cruzada (CCM). Ele é baseado na diferença de tempo entre ecos subsequentes. A desvantagem desse método é o alto custo computacional que pode inviabilizar a medição em tempo real. Nesse contexto, um estimador mais recente chamado de autocorrelação estendida (EAM), combina o ACM e o CCM para medir velocidades mais altas com menor custo computacional.

Dessa forma, o presente trabalho de doutorado apresenta um método ultrassônico inovador para medição de velocidades mais altas, com melhor performance computacional, além de propor o uso de equipamentos END de relativo baixo custo. Esse conjunto de técnica e equipamento será testado e validado em dois problemas distintos da fluidodinâmica.

O primeiro será a medição do perfil de velocidade, dentro de um cilindro girante, de um líquido, que se comporta como um corpo rígido e tem fácil solução analítica. O experimento tem como finalidade validar e comparar as velocidades obtidas por ACM, CCM e EAM, com base na sua vasta utilização na literatura de ultrassom doppler (Takeda, 2012).

O segundo experimento tem como enfoque avaliar o perfil de velocidade em um escoamento multifásico líquido-sólido-gás em uma tubulação vertical, um dos cenários possíveis durante a produção e exploração de óleo e gás.

Com isso, esta tese tem como contribuição disponibilizar para a comunidade científica, atuante na área de fluidodinâmica, uma ferramenta ultrassônica de melhor desempenho e mais acessível para medição de perfil de velocidade, validada em dois experimentos distintos.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho se insere em duas linhas de pesquisa principais, cada uma com seus objetivos específicos:

- (i) Avaliação dos estimadores de velocidade EAM, ACM e CCM, utilizando um pulsador END, para medição do perfil de velocidade de uma solução líquida dentro de um cilindro girante. Os seguintes objetivos específicos foram abordados:
 - Fazer uma revisão das técnicas para medição de perfil de velocidade.

- Desenvolver um Sistema para aquisição e processamentos dos dados de ultrassom.
 - Construir um aparato experimental para gerar velocidades controladas para validação das técnicas.
 - Validar a aplicação do pulsador END com técnicas clássicas como ACM e CCM e também com nova técnica proposta, o EAM.
- (ii) Medição do perfil de velocidade em escoamentos multifásicos em tubulações verticais utilizando equipamentos de ultrassom END. Os seguintes objetivos específicos foram abordados:
- Fazer uma revisão das técnicas para medição de perfil de velocidade/velocidade média em escoamentos multifásicos.
 - Avaliar a técnica ultrassônica Doppler utilizando um equipamento END para medição de velocidade em escoamentos multifásicos óleo-areia-gás em tubulação vertical.
 - Avaliar quais parâmetros do escoamento podem ser medidos.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese é composta por sete capítulos descritos a seguir:

O **Capítulo 1** apresenta a motivação do trabalho bem como seus objetivos.

O **Capítulo 2** apresenta uma revisão bibliográfica da medição de velocidade por ultrassom Doppler e sua aplicação na área de fluidodinâmica. Em seguida é apresentada a fundamentação teórica da técnica e suas características.

O **Capítulo 3** apresenta detalhes do processamento de sinais para estimação de velocidade: pré-processamento, algoritmos de estimação e o pós-processamento. As técnicas mais difundidas na área, autocorrelação e correlação cruzada, e também o novo método proposto, a autocorrelação estendida, são explicadas em detalhes.

O **Capítulo 4** apresenta o sistema de aquisição/processamento de dados e o aparato experimental desenvolvido para validação dos algoritmos para estimação de velocidade. Os resultados obtidos utilizando as técnicas propostas também são mostradas nesse capítulo.

O **Capítulo 5** apresenta conceitos de escoamento multifásico e uma revisão bibliográfica das técnicas de medição de velocidade aplicadas ao fenômeno, em especial, no uso da técnica de ultrassom Doppler.

O **Capítulo 6** apresenta os resultados obtidos pela técnica ultrassônica aplicada em um escoamento multifásico vertical. Uma filmadora de alta velocidade também é utilizada para validar as medições. Os resultados obtidos também são mostrados nesse capítulo.

O **Capítulo 7** apresenta as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

O **Apêndice A** mostra as publicações diretamente e indiretamente relacionadas com este trabalho como artigos, trabalhos de conclusão de curso orientados e premiações.

O **Apêndice B** mostra a fundamentação teórica de ultrassom e algumas características dos transdutores.

O **Apêndice C** mostra informações sobre medidores multifásicos que complementam este trabalho.

O **Apêndice D** mostra o software desenvolvido para processamento de imagens do escoamento multifásico.

O **Apêndice E** mostra planilhas de incerteza de medição que complementam esta tese.

O **Apêndice F** mostra o diagrama em blocos do *software* LabView desenvolvido.

2 MEDIÇÃO DE PERFIL DE VELOCIDADE POR ULTRASSOM

Nesse capítulo será primeiramente apresentada a revisão bibliográfica da técnica de medição de velocidade por ultrassom Doppler, e também sua aplicação na área de fluidodinâmica. Em seguida será apresentada a fundamentação teórica e algumas características práticas relacionadas ao uso da técnica.

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA TÉCNICA ULTRASSÔNICA DOPPLER

A medição de velocidade por ultrassom Doppler teve início nas pesquisas com o efeito Doppler iniciada na área médica, no final dos anos 50, para medição do fluxo sanguíneo em pequenos vasos (FRANKLIN; SCHLEGEL; RUSHMER, 1961; SATOMURA, 1957). Na época apenas a velocidade média era estimada por meio do desvio de frequência entre o sinal enviado e o recebido (efeito Doppler) do sinal de ultrassom contínuo. Essa técnica possuía muitas restrições com relação aos equipamentos da época, então Baker (1970) propôs o uso de ultrassom em modo pulsado para medir a velocidade. Ao invés de medir o desvio de fase entre a onda emitida e a recebida, a técnica consiste em medir a diferença de fase entre refletores (hemácias presentes no sangue) em pulsos de ultrassom consecutivos. A vantagem do método é a medição do perfil de velocidade ao invés de somente a velocidade média, pois a posição do eco na profundidade é conhecida. Apesar da técnica pulsada não utilizar o efeito Doppler clássico como era no processamento do sinal contínuo, a nomenclatura até hoje gera controvérsias (JENSEN, J. A., 2006). Neste trabalho será mantida a nomenclatura Doppler devido à grande quantidade de trabalhos que ainda utilizam o termo. Em 1975 surge o Mark1, primeiro equipamento médico comercial de Doppler pulsado que impulsiona as pesquisas na área (WOO, 2014). Um dos primeiros trabalhos aplicado a mecânica dos fluidos com a técnica é o de Fox (1981), que mostra análises teóricas e experimentais para detectar perfis de velocidade em escoamentos monofásicos. Kasai e Namekawa (1985) conceberam o uso do método de autocorrelação (ACM), para medir o desvio de fase entre sinais consecutivos na área médica. A técnica é a mais utilizada na área até hoje, pois proporciona uma boa relação sinal ruído (SNR) e uma baixa variância. Isso ocorre devido ao uso de sinal de banda estreita (ideal para se medir a fase), que possui longa duração e assim possibilita uma transmissão maior de energia. Apesar de suas vantagens, o ACM possui a limitação de que os sinais de ultrassom devem estar no mesmo ciclo de onda, do contrário pode ocorrer ambiguidade de fase (não se sabe se é o início de um ciclo ou se é um próximo ciclo) e conseqüentemente uma medição

incorreta de velocidade. Essa limitação também é conhecida como *aliasing*, ou limite na amostragem dos dados pelo teorema de Shannon-Nyquist. Assim, a técnica pode ser utilizada até um certo limite de velocidade. Pensando nesse problema, Bonnefous e Pesque(1986) propuseram o uso do método da correlação cruzada (CCM) para medir a diferença de tempo entre os pulsos ao invés de usar a diferença de fase. Não existe limitação de velocidade nesse procedimento, porém a técnica tem uma alta carga computacional que limita sua implementação em equipamentos para uso em tempo real.

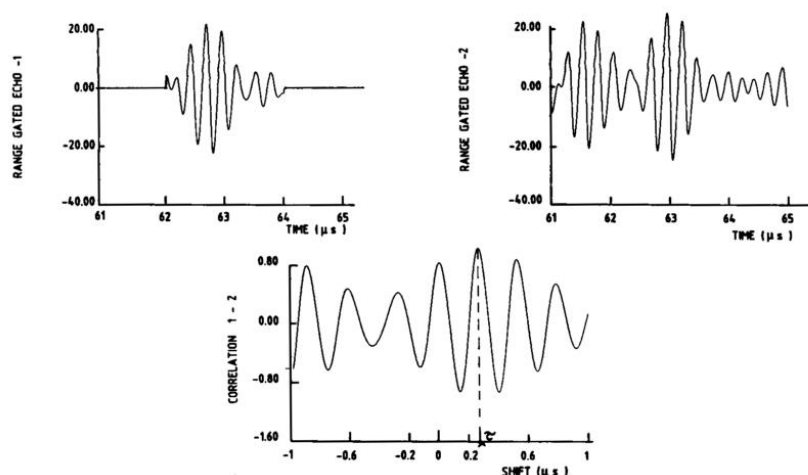


Figura 2.1. Medição no domínio do tempo do fluxo sanguíneo em um sinal que excede o limite da técnica Doppler convencional (gráficos em cima). O gráfico de baixo mostra o pico da função de correlação cruzada para obter a distância entre sinais (Bonnefous e Pesque, 1986).

Outros pesquisadores também continuaram a investigar a correlação cruzada como Torp *et al.* (1993) e Jensen(1993). Este último sugeriu um algoritmo de correlação cruzada utilizando apenas o sinal (positivo ou negativo) para diminuir o alto custo computacional. Existem outros métodos de estimação da velocidade pelo deslocamento temporal da onda, como por exemplo a soma das diferenças quadráticas que tem performance similar ao CCM (VIOLA, 2003).

Estimadores que não utilizam somente fase ou tempo também foram propostos, como o processamento do sinal que faz uso da transformada de Fourier em duas dimensões (WILSON, 1991). A técnica também não tem o limite de velocidade do ACM mas possui elevado custo computacional, o que também contribuiu para que ela não fosse tão utilizada. A ideia também foi utilizada por Torp e Kristoffersen (1995), que propuseram uma técnica baseada em análise espectral chamada de *Velocity Matched Spectrum*. Um desenho esquemático da técnica é mostrado na Figura 2.2. São utilizados dados no espaço e no tempo para formar o espectro de velocidade.

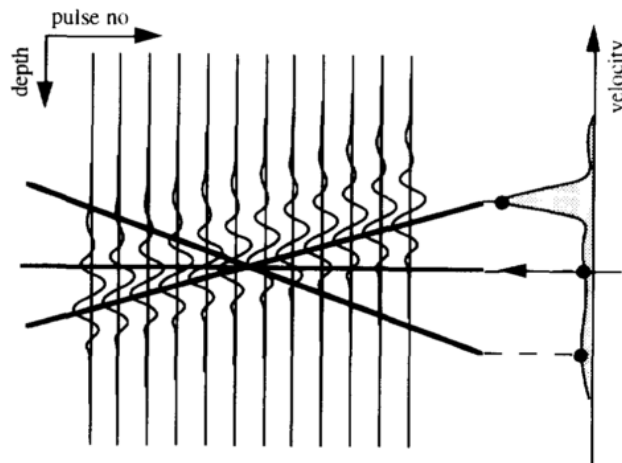


Figura 2.2. O espectro de velocidade é obtido pela soma de sinais RF ao longo do tempo e espaço. O espectro é mostrado do lado direito (Torp e Kristoffersen, 1995).

Outra técnica chamada de *staggered pulse repetition time/frequency* (PRT/PRF), para retirar a ambiguidade da medição de diferença de fase, foi proposta por Sirmans (1976) na área de radares. O método consiste em utilizar duas frequências de repetição de pulsos diferentes, como equipamentos distintos, e fazer a diferença entre as diferenças de fases encontradas (Figura 2.3). Esse conceito foi utilizado por Holleman (2003) e Zedel (2010) na área de ultrassom Doppler pulsado, aplicado na área de oceanografia, e recentemente por Muramatsu *et al.* (2016) na área de fluidodinâmica. As desvantagens deste método são o aumento da incerteza de medição devido à necessidade de se fazer duas vezes a diferença de fase, e o aumento da complexidade do hardware para gerar pulsos de ultrassom em frequências distintas.

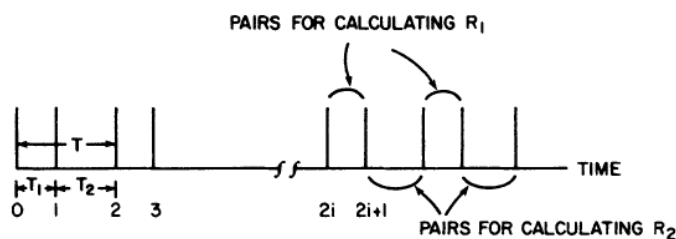


Figura 2.3. Esquema do método *staggered* PRT/PRF. A autocorrelação R_1 é calculada no período T_1 e a autocorrelação R_2 é calculada para o período T_2 . A verdadeira fase é obtida pela diferença das fases encontradas por R_1 e R_2 (Sirmans, 1976).

Uma técnica que combina o método da autocorrelação com a correlação cruzada, chamada de autocorrelação estendida (EAM), foi proposta por Lai *et al.* (1997) na área médica. A ideia é basicamente utilizar primeiramente a autocorrelação para encontrar a fase e posteriormente a correlação cruzada para corrigir a ambiguidade e encontrar a fase real. Essa será a técnica utilizada e validada neste trabalho para aplicação na área de fluidodinâmica. Mais detalhes sobre o método serão mostrados no próximo capítulo deste trabalho.

O uso de equipamentos END para medição de velocidade é pouco estudado na literatura. Um pulsador END foi utilizado pioneiramente nas pesquisas de Ofuchi *et al.* (2014), parte desta tese, e no trabalho de Coutinho *et al.* (2014), porém na área de detecção de interface líquido-gás e não na área de medição de velocidade. Um estudo com foco no equipamento END foi realizado por Nguyen *et al.* (2015), em que ele utilizou um pulsador END tipo pico (*spike*) para avaliar escoamentos monofásicos e bifásicos com a técnica ACM. O pulsador foi empregado com sucesso para medição das velocidades propostas. No presente trabalho será utilizado um pulsador END tipo onda quadrada e além disso, o estimador perfil de velocidade por EAM será avaliado para medição de velocidades além do limite de Nyquist.

2.2 APLICAÇÕES DA TÉCNICA ULTRASSÔNICA DOPPLER NA ÁREA DE FLUIDODINÂMICA

A primeira vez que o ultrassom Doppler foi utilizado na área de fluidodinâmica foi quando Takeda (1986) utilizou equipamentos médicos (baseados em ACM) para investigar escoamentos regidos pela escoamento de Poiseuille (Figura 2.4) e escoamentos tipo *vortex* de Taylor, sendo então pioneiro nesse tipo de medição na área de fluidodinâmica.

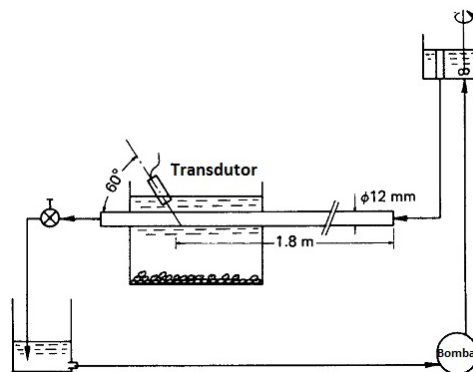


Figura 2.4. Experimento realizado por Takeda (1986). A velocidade de um escoamento monofásico água e partículas de Al_2O_3 foi medido.

Os experimentos foram conduzidos no Instituto Paul Scherrer na Suíça. Posteriormente em 1991, Takeda desenvolveu o equipamento batizado de UVP (*Ultrasonic Velocity Profiler*), voltado para pesquisas na área de fluidodinâmica. (TAKEDA, 1991). Uma empresa chamada Met-Flow SA foi criada para comercializar o produto e é uma das poucas que o faz até hoje. Desde então, surgiram várias linhas de pesquisa na área de mecânica dos fluidos com a aplicação do UVP. Em 1996 surgiu, no Instituto Paul Scherrer, o “*International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering - ISUD*” que reúne pesquisadores da área a cada dois anos.

Atualmente o ultrassom Doppler tem sido utilizado em diversas aplicações em que os fluidos são opacos ou possuem difícil acesso para visualização direta. Alguns exemplos de aplicações são em escoamentos metal líquido, escoamentos de fluidos não newtonianos, escoamentos multifásicos, escoamentos em canais abertos como rios e esgotos, escoamentos em tubulações metálicas, entre outros. A Tabela 2.1 relaciona a pesquisa de alguns autores nas áreas citadas.

Tabela 2.1. Aplicações diversas da técnica de ultrassom Doppler na área de estudos fluidodinâmicos.

Referencia	Aplicação	Fluido
Müller (1997)	Reologia de fluidos	Glicerina e água
Ouriev <i>et al.</i> (2003)	Reologia de fluidos Alimentícios	Chocolate
Birkhofer <i>et al.</i> (2008)	Reologia de fluidos Alimentícios	Manteiga
Wiklund <i>et al.</i> (2012)	Construção Civil	Cimento e água
Tezuka <i>et al.</i> (2008b)	Hidrelétricas	Água
Aritomi <i>et al.</i> (1996b)	Escoamentos Bifásicos	Água e ar
Murakawa <i>et al.</i> (2005)	Escoamentos Bifásicos	Água e ar
Murai <i>et al.</i> (2011)	Escoamentos Bifásicos	Água e ar
Takeda (1987)	Metal líquido	Mercúrio
Eckert <i>et al.</i> (2005)	Metal líquido	Solda de estanho
Yanagisawa <i>et al.</i> (2010)	Metal líquido	Galium
Lemmin e Rolland (1997)	Canais abertos e lagos	Água
Abda <i>et al.</i> (2009)	Turbidez e velocidade de esgoto	Esgoto

As Figuras a seguir ilustram algumas das pesquisas citadas na tabela:

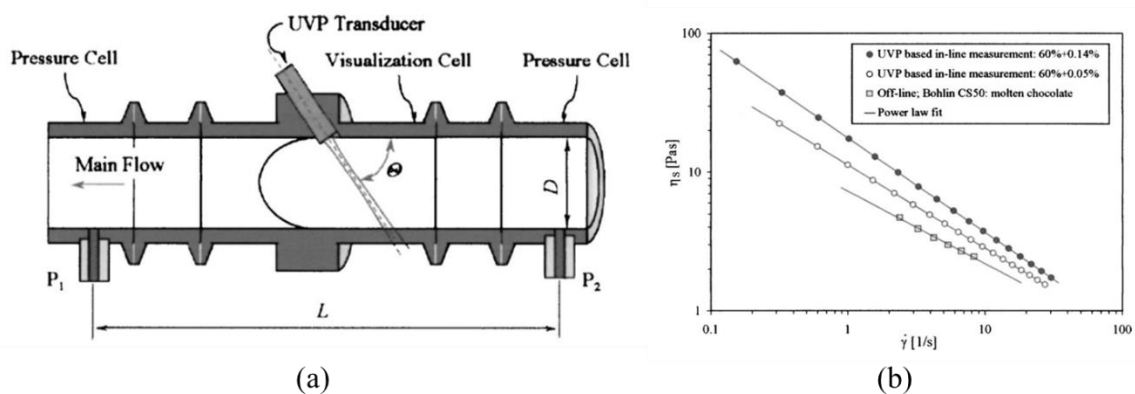


Figura 2.5. Experimento realizado por Ouriev (2003) para medição em tempo real da reometria do chocolate. (a) Aparato experimental para medição da velocidade por ultrassom e o diferencial de pressão para o cálculo de taxa de cisalhamento, tensão de cisalhamento e por fim a viscosidade do fluido. (b) Comparação entre a reometria em tempo real proposta e um reometro off-line.

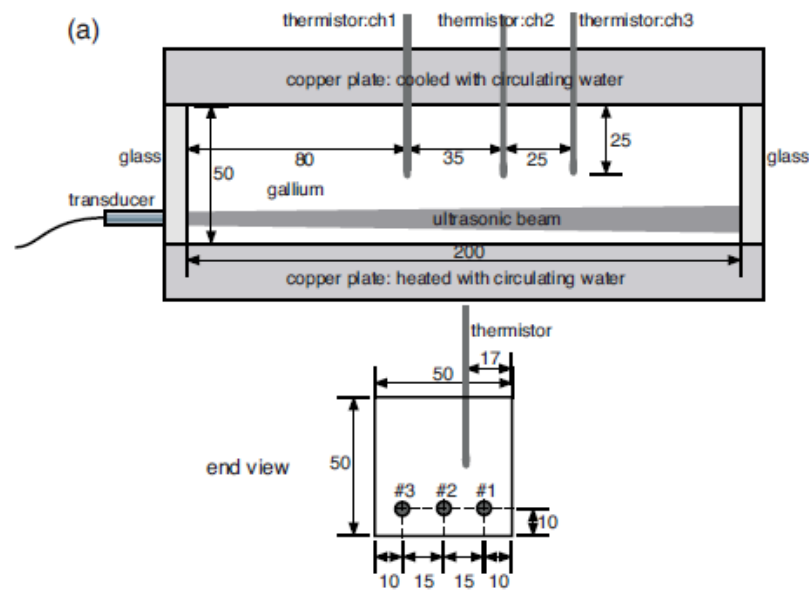


Figura 2.6. Experimento realizado por Yanagisawa (2010) para medição da temperatura e da velocidade do escoamento metal líquido (Galium). O estudo teve como objetivo avaliar a convecção térmica do fluido devido a campos eletromagnéticos.



Figura 2.7. Experimento realizado por Tezuka (2008) para medição do perfil de velocidade em tubos largos em uma usina hidrelétrica.

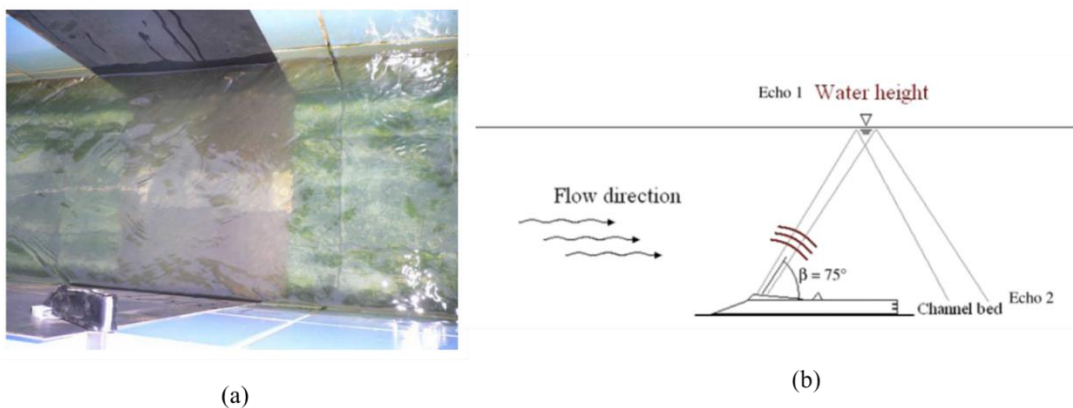


Figura 2.8. Experimento realizado por Abda *et al.*(2008) para medição do perfil de velocidade em canais abertos. (a) Canal de saída de esgoto. (b) Esquemático de medição.

2.3 FUNDAMENTOS DE ULTRASSOM NO MODO DOPPLER

A técnica de ultrassom Doppler pode ser empregada em modo pulsado ou contínuo. A Figura 2.9 ilustra o pulso elétrico e a onda mecânica gerada pelo transdutor nos modos pulsado e contínuo.

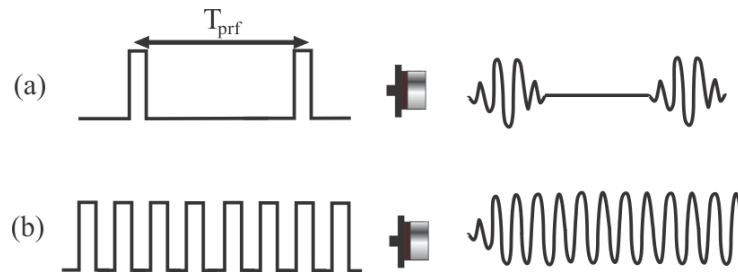


Figura 2.9. – (a) Ultrassom modo pulsado, em que existe um período de tempo entre pulsos de T_{prf} . (b) modo contínuo, em que o transdutor é constantemente excitado para geração de uma onda contínua.

Os primeiros estudos do Efeito Doppler foram realizados em modo contínuo, pois a frequência do sinal é bem definida facilitando a detecção do desvio de frequência médio. Porém, não é possível detectar em qual posição espacial ocorre o fenômeno. No modo pulsado é possível detectar refletores dentro do intervalo de repetição de pulsos T_{prf} . No entanto, o pulso de ultrassom é muito estreito, o que torna a banda de frequência larga, inviabilizando a detecção de um desvio de frequência muito pequeno (JENSEN, J. A., 2006). Por exemplo, o desvio de frequência para transdutores na faixa de MHz é na ordem de kHz para velocidades de até 100 m/s. A Figura B.7 (no apêndice B) mostra que a banda de frequência dos transdutores da Olympus é maior do que 3 MHz, portanto não seria possível distinguir o desvio de frequência da própria variação de frequência do transdutor. Desta forma, é utilizada uma outra característica dos sinais de ultrassom pulsado, que é o movimento dos refletores capturado em pulsos consecutivos. Esse fenômeno é utilizado para medir a velocidade, como ilustra a Figura 2.10.

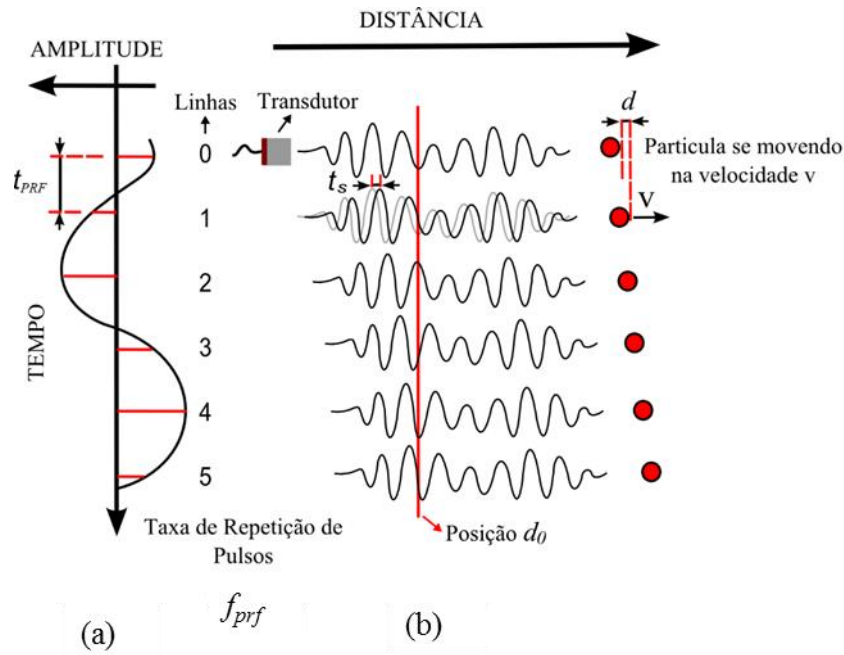


Figura 2.10. – Detecção da velocidade no modo ultrassom pulsado.

Uma posição no espaço d_0 foi amostrada a uma taxa de repetição de pulsos f_{prf} que também pode ser representado por intervalos entre pulsos de T_{prf} . O refletor de velocidade v , percorre uma distância d durante o intervalo de tempo T_{prf} portanto:

$$v = \frac{d}{T_{prf}}. \quad (2.1)$$

Conforme o refletor se desloca pela distância d , o pulso de ultrassom adquirido sofre um deslocamento de tempo t_s que pode ser medido por meio da velocidade do som no meio c e a distância de ida e volta percorrida pelo pulso:

$$t_s = \frac{2d}{c}. \quad (2.2)$$

Combinando a equação (2.2) e a equação (2.1), a velocidade se torna função do movimento dos ecos de ultrassom e pode ser calculada como:

$$v = \frac{c f_{prf}}{2} t_s \quad (2.3)$$

onde $f_{prf} = 1/T_{prf}$ é a frequência de repetição de pulsos. O tempo t_s também pode ser representado como uma diferença de fase $\Delta\phi$ entre duas ondas de mesma frequência f_0 ou período T_0 como mostra a Figura 2.11 e a Equação (2.4).

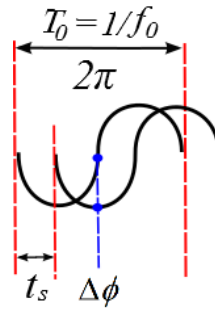


Figura 2.11. – Representação da diferença de fase.

$$t_s = \frac{\Delta\phi}{2\pi f_0} \quad (2.4)$$

Além do desvio de fase, é necessário também conhecer o sentido do deslocamento, se positivo ou negativo. Essa informação é obtida por meio do sinal em fase e quadratura, que será discutido em uma subseção a parte.

A relação entre a diferença de fase e a velocidade é obtida substituindo-se a Equação (2.2) na Equação (2.4). Alguns autores chamam essa diferença de fase como desvio Doppler.

$$v = \frac{c f_{prf}}{4\pi f_0} \Delta\phi \quad (2.5)$$

A equação (2.5) é válida se a fase estiver no intervalo de $]-\pi, \pi]$. Fora deste intervalo o valor de fase recomeça e ocorre *aliasing* conforme explicado pelo teorema de Nyquist-Shannon. Considerando a frequência de repetição de pulsos f_{prf} na equação (2.5) como uma taxa de amostragem, esse intervalo válido de fase corresponde ao limite de amostragem de Nyquist. Assim, o valor máximo de velocidade mensurável pode ser representado como:

$$v_{max} = \frac{c f_{prf}}{4f_0} \quad (2.6)$$

Outra limitação bem conhecida da técnica ocorre devido a distância que os pulsos de ultrassom devem percorrer. A frequência de repetição de pulsos deve estar ajustada para que um segundo pulso seja disparado somente depois que o primeiro tenha sido recebido. Assim, é necessário levar em conta a velocidade do som no meio c e a distância percorrida d como mostra a equação:

$$d_{max} = \frac{c}{2f_{prf}} \quad (2.7)$$

Combinando as equações (2.6) e (2.7), os limites de velocidade e distância são relacionados de acordo com a equação (2.8):

$$v_{max}d_{max} = \frac{c^2}{8f_0} \quad (2.8)$$

Essa equação representa uma relação de compromisso entre velocidade e distância que deve ser levado em conta devido ao limite de Nyquist mencionado.

2.3.1 Sinal em fase e quadratura

Determinar o sentido do desvio de fase, ou seja, se a frequência é positiva ou negativa, é um problema resolvido utilizando a modulação em fase e quadratura do sinal (I/Q de *In-phase and Quadrature*). Os dados I/Q são as partes real e imaginária de um sinal (sinal complexo), que estão defasadas entre si por uma diferença de 90° (1/4 ciclo), por isso a nomenclatura “quadratura”. A Figura 2.12 ilustra a composição dos dados I/Q.

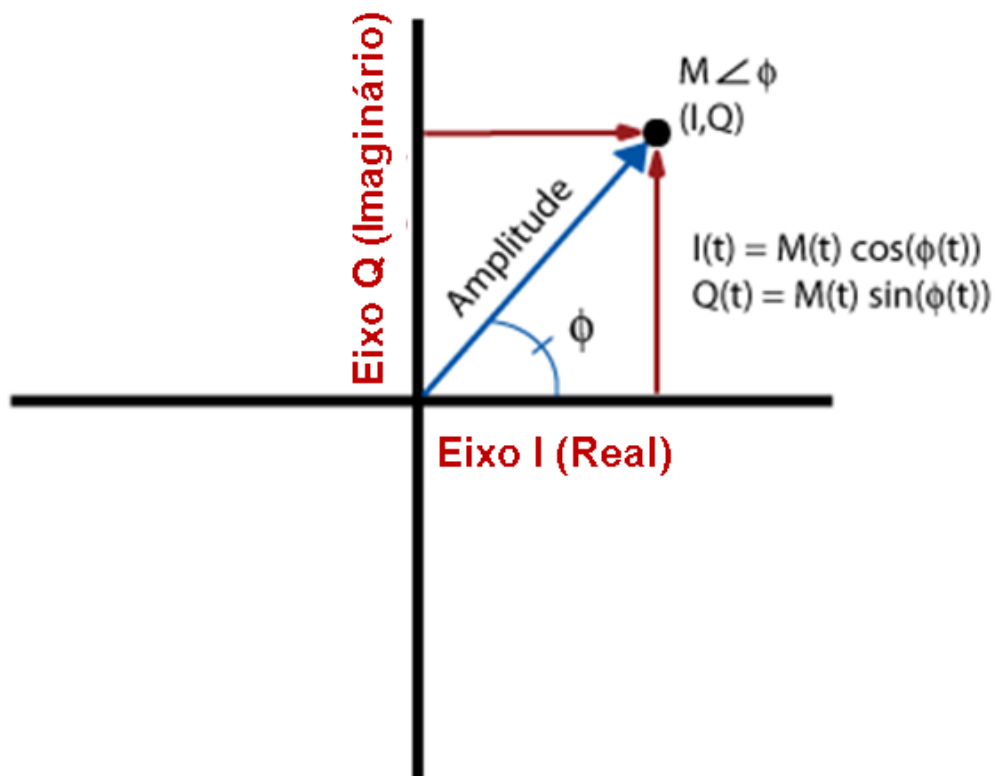


Figura 2.12. – Representação polar das informações em fase e quadratura de uma onda.

O embasamento matemático da modulação em fase e quadratura são as seguintes identidades trigonométricas:

$$A \cos(x + \varphi) = A \cos(x) \cos(\varphi) - A \sin(x) \sin(\varphi) \quad (2.9)$$

$$A \cos(x + \varphi) = I \cos(x) - Q \sin(x) \quad (2.10)$$

onde:

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{I}\right) + \begin{cases} 0, & A \geq 0 \\ \pi, & A < 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Utilizando os sinais reais e imaginários, é possível determinar o sentido de rotação do vetor como mostra a Figura 2.13.

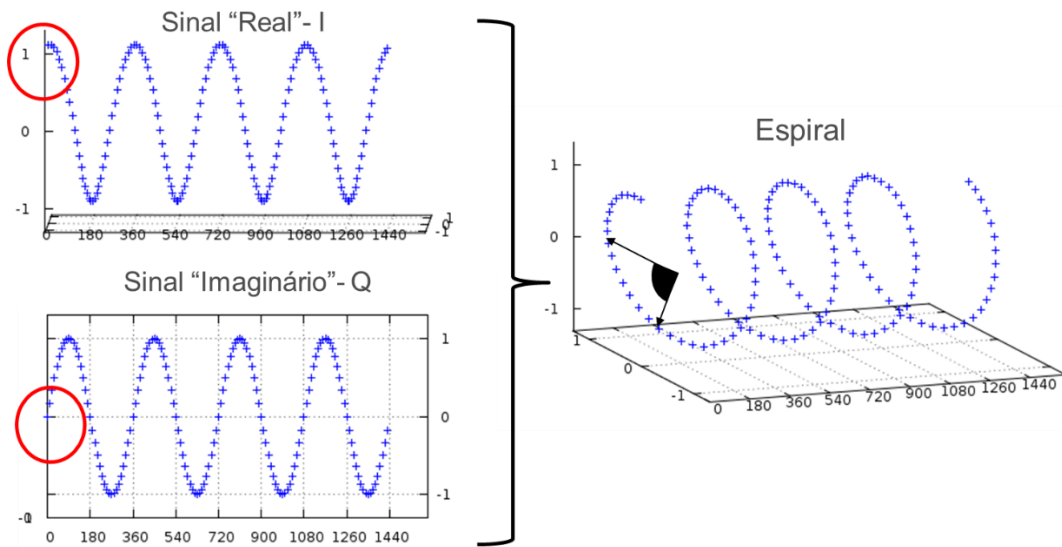


Figura 2.13. – Combinação dos sinais reais e imaginários que são defasados de 90° para determinar se a frequência é positiva ou negativa. No exemplo mostrado a frequência é positiva.

Os dados em fase e quadratura podem ser demodulados e obtidos do sinal original de ultrassom utilizando técnicas de *hardware* ou *software*. A Figura 2.14 mostra um esquema de *hardware* para demodulação do sinal complexo. O sinal original deve ser multiplicado pelo cosseno e o seno da portadora. Em seguida é utilizado um filtro passa-baixas para eliminar o sinal da portadora de alta frequência, restando apenas o sinal modulante. Atualmente existem diversos circuitos integrados (CIs) para essa finalidade, como por exemplo o AD8339 da empresa Analog Devices.

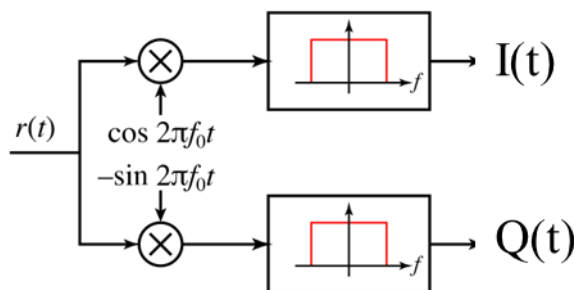


Figura 2.14. – Esquema de um *hardware* para demodulação complexa do sinal.

Outra abordagem consiste na amostragem/digitalização dos dados e aplicação da transformada de Hilbert (OPPEMHEIM; SCHAFER, 1989), que gera um verdadeiro desvio de

fase de 90° em toda faixa de frequência. Esse método foi utilizado para a obtenção dos dados em fase e quadratura no presente trabalho.

2.3.2 Volume de Medição

O volume de medição define a localização no campo acústico em que os refletores devem ser reconhecidos em medições consecutivas, para que seja possível o cálculo da velocidade. Ele pode ser considerado como um cilindro (desconsiderando a abertura do transdutor) cuja altura é definida pela frequência básica do transdutor multiplicado pelo número de ciclos de onda, e cuja a base é definida pelo diâmetro ativo do transdutor, como mostra a Figura 2.15.

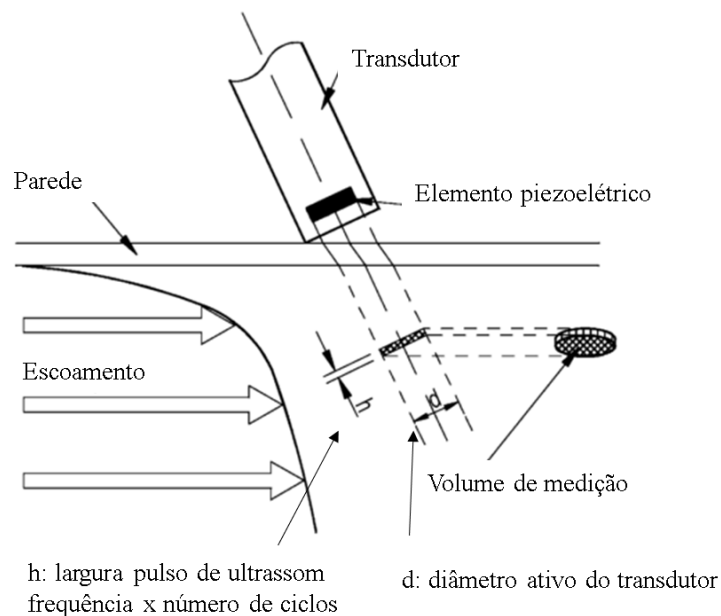


Figura 2.15. – Esquemático do volume de medição para o cálculo da velocidade.

Para a correta medição do perfil de velocidade, é necessário que sejam escolhidos refletores adequados ao volume de medição. A próxima subseção mostra mais detalhes sobre esse tema.

2.3.3 Refletores

A medição de velocidade por ultrassom Doppler utiliza os ecos refletidos pelas partículas traçadoras misturadas proposadamente ou não no fluido. Segundo Takeda (2012) existem três fatores a se considerar para a correta seleção das partículas utilizadas no experimento: volume de medição, densidade e concentração.

a) Volume de Medição

Takeda (2012) recomenda que as partículas tenham aproximadamente de um quarto a metade do comprimento de onda do pulso de ultrassom. Caso sejam menores do que o recomendado, o eco das partículas tem uma baixa amplitude, comprometendo a relação sinal ruído dos dados. Se forem maiores do que o recomendado, a medição ainda é possível, mas podem ocorrer múltiplas reflexões entre os refletores, distorcendo o perfil de velocidade. Para refletores maiores do que o próprio diâmetro ativo do transdutor, dificilmente é possível medir duas emissões consecutivas para calcular a velocidade. A Figura 2.16 ilustra a relação entre volume de medição e o tamanho dos refletores.

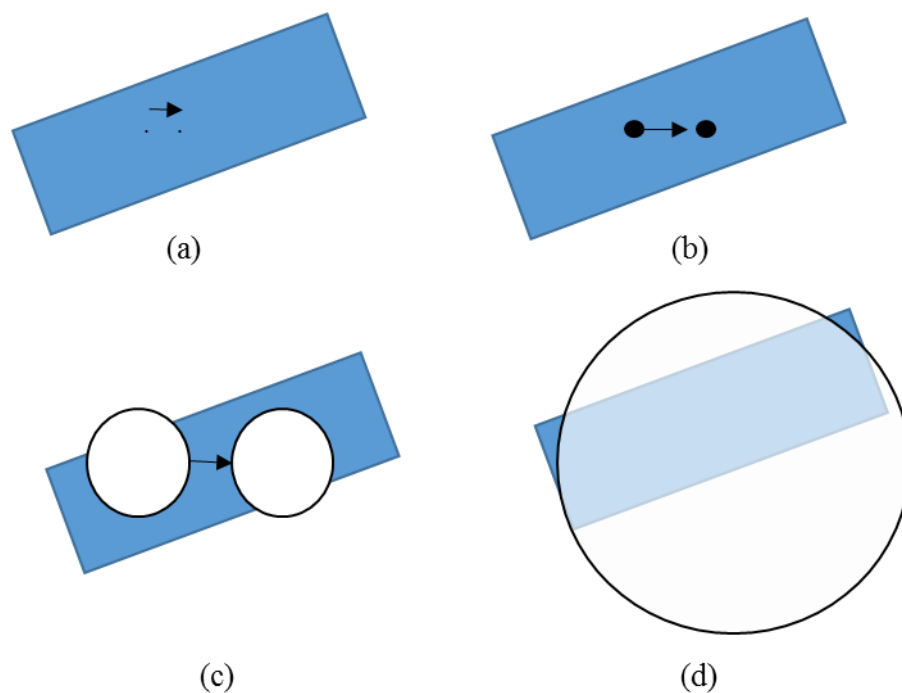


Figura 2.16. – Tamanho dos refletores em relação ao volume de medição. (a) O refletor é muito pequeno, causando ecos de baixa relação sinal ruído. (b) O refletor tem a medida entre $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ do comprimento de onda da frequência básica do transdutor, ideal para as medidas. (c) O refletor tem medidas maiores do que o recomendado, o que aumenta a probabilidade de múltiplas reflexões entre eles gerando distorções na medida. (d) O refletor é maior do que o diâmetro ativo do transdutor, nesse caso o eco da partícula é como o de uma parede, praticamente não é possível medir duas emissões sucessivas e calcular a velocidade corretamente.

b) Densidade dos refletores

O ultrassom mede a velocidade das partículas para inferir a velocidade do líquido. Uma diferença muito grande entre as densidades do refletor e do fluido pode levar a erros de medição, pois a partícula não segue o escoamento na mesma velocidade.

c) Concentração

A medição de velocidade só pode ocorrer caso pelo menos uma partícula esteja presente no volume de medição. Quanto mais “volumes de medição” medidos, maior será a

quantidade de medidas, seja no tempo ou no espaço. Assim, a velocidade e a concentração de partículas influenciam na medição, como mostra a Figura 2.17.

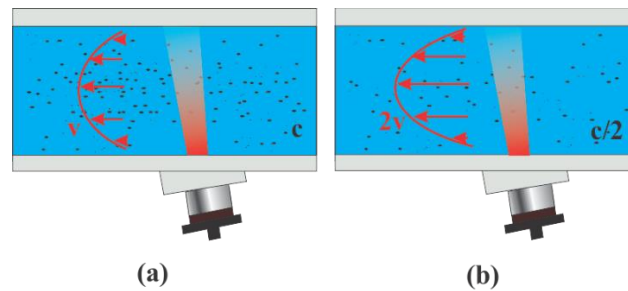


Figura 2.17. – Fluxo de partículas. (a) Medição de um número adequado de “volumes de medição” dado uma concentração, uma velocidade e um intervalo de tempo. (b) Apesar da redução na concentração ($c/2$), o aumento na velocidade ($2v$) também aumenta o número de “volumes de medição” adquiridos no mesmo intervalo de tempo de (a).

A concentração e velocidade em uma situação normal como mostrado na Figura 2.17a tem o mesmo fluxo de partículas em que a concentração é reduzida pela metade, mas a velocidade é dobrada como mostra a Figura 2.17b. Desta forma, um escoamento rápido não precisa de uma alta concentração de partículas para a técnica funcionar. Porém, caso se deseje analisar a velocidade próxima à parede do tubo em que a velocidade é menor, é preciso uma maior quantidade de partículas. Assim, é definido uma relação entre concentração e velocidade para a medição de um valor mínimo de “volumes de medição”.

Para o caso de uma concentração muito alta, o sinal pode ser muito atenuado, causando uma baixa relação sinal ruído dos dados. Assim, existe também uma faixa de concentração máxima a ser considerada. Para efeito prático, o fabricante de equipamentos UVP Met-flow SA relata que escoamentos com concentração de particulados de até 10% ainda são mensuráveis. Porém, deve-se levar em conta a relação sinal ruído dos ecos recebidos, que pode variar de acordo com o fluido, distância percorrida e interfaces como paredes que atenuam o sinal.

2.3.4 Ângulo de Medição

A velocidade u medida pela técnica ultrassônica se limita à região em frente ao transdutor e a deslocamentos na direção da sonda emitida. Por questões de posicionamento não intrusivo do sensor, para se medir o vetor de velocidade v é necessário um ângulo entre a direção do escoamento e a linha de medição como ilustra a Figura 2.18.

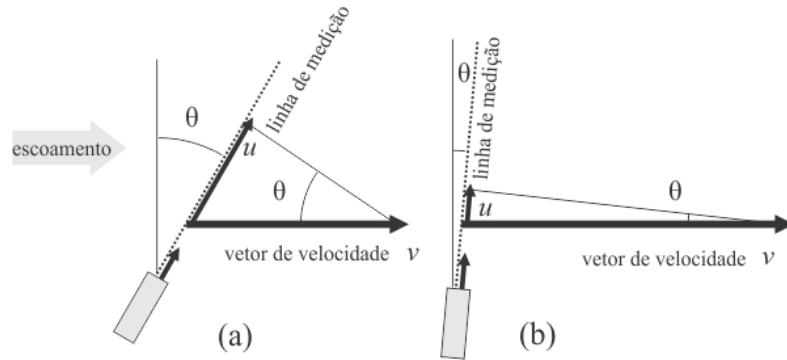


Figura 2.18. – Relação entre a velocidade do escoamento e a velocidade medida por ultrassom. (a) Ângulo grande. (b) Ângulo pequeno.

Fonte: Adaptado de Takeda (2012)

Quanto maior o ângulo, menor a velocidade máxima mensurável, como mostra a Figura 2.18 (a) em relação à Figura 2.18 (b). A relação trigonométrica que relaciona u e v nesse caso é dada pela Equação(2.12)

$$v = \frac{u}{\text{sen } \theta} \quad (2.12)$$

A desvantagem do ângulo pequeno é o erro propagado na velocidade devido à imprecisão da montagem experimental. Por exemplo, errar 1 grau em um ângulo de 5 graus representa 20% de erro, enquanto que errar 1 grau em 30 graus de ângulo representa 3%. Desta forma é preciso levar em consideração a velocidade do escoamento e a instalação dos transdutores para selecionar o ângulo mais apropriado.

2.4 APRESENTAÇÃO DOS DADOS DE ULTRASSOM

A técnica ultrassônica é conhecida pelas imagens geradas através dos ecos refletidos. Nessa seção serão mostradas algumas formas de apresentação dos dados de ultrassom para sua posterior interpretação. Serão mostrados exemplos com o uso de apenas um transdutor, configuração utilizada neste trabalho.

2.4.1 A-Scan

A forma mais básica de apresentação de uma onda ultrassônica é o A-Scan (Amplitude). Nessa modalidade de apresentação, o tempo de trânsito e a amplitude do eco são representados em um gráfico simples de amplitude x tempo como mostra a Figura 2.19.

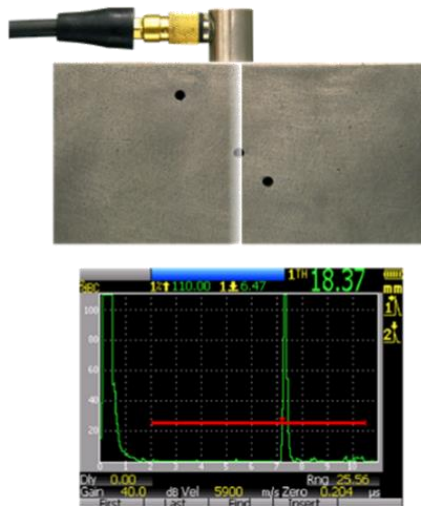


Figura 2.19. – Exemplo de A-Scan

Adaptado de Olympus (2014b)

O A-scan é muito utilizado para avaliar a SNR do sinal e a posição de interfaces como paredes.

2.4.2 B-Scan

O B-Scan (Brilho) é um conjunto de A-Scan adquiridos continuamente com o transdutor em movimento sobre o alvo. As amplitudes são convertidas em uma escala de cores que permite formar uma imagem no tempo (Figura 2.20). A abscissa e a ordenada podem representar tempo ou espaço e as cores mostram a amplitude.

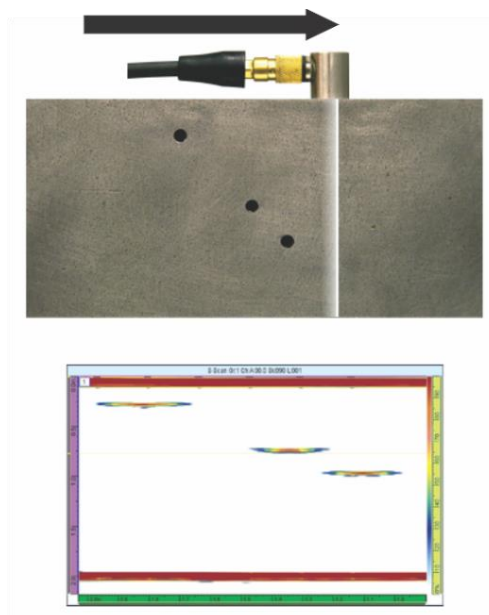


Figura 2.20. – Exemplo de B-Scan

Adaptado de Olympus (2014b)

2.4.3 M-Scan

O M-Scan (Movimento) é similar ao B-Scan. Trata-se de um conjunto de A-Scan adquiridos continuamente, porém, o transdutor permanece imóvel e o alvo está em movimento. Essa é a configuração típica de ultrassom aplicado a escoamentos como mostra a Figura 2.21. Na imagem gerada por ultrassom, o transdutor encontra-se embaixo da tubulação horizontal.

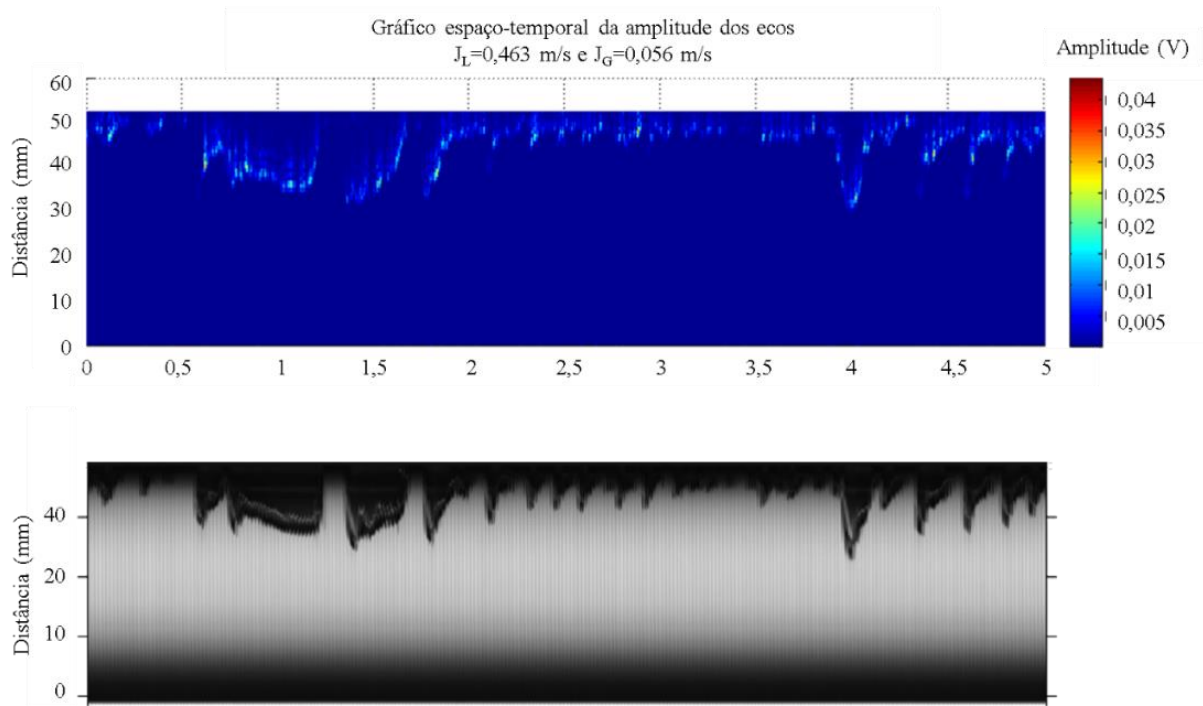


Figura 2.21. – Exemplo de M-Scan de um escoamento bifásico horizontal (transdutor emitindo pulsos de baixo para cima) comparado a uma imagem adquirida por uma câmera de alta velocidade.

2.4.4 Perfil de Velocidade

A apresentação do perfil de velocidade é similar ao modo M, porém, a amplitude do sinal é substituída pela velocidade. Um exemplo de perfil de velocidade de um escoamento em golfadas horizontal pode ser observado na Figura 2.22. As bolhas alongadas estão na parte superior do escoamento. A velocidade no pistão de líquidos é maior do que na região abaixo das bolhas alongadas.

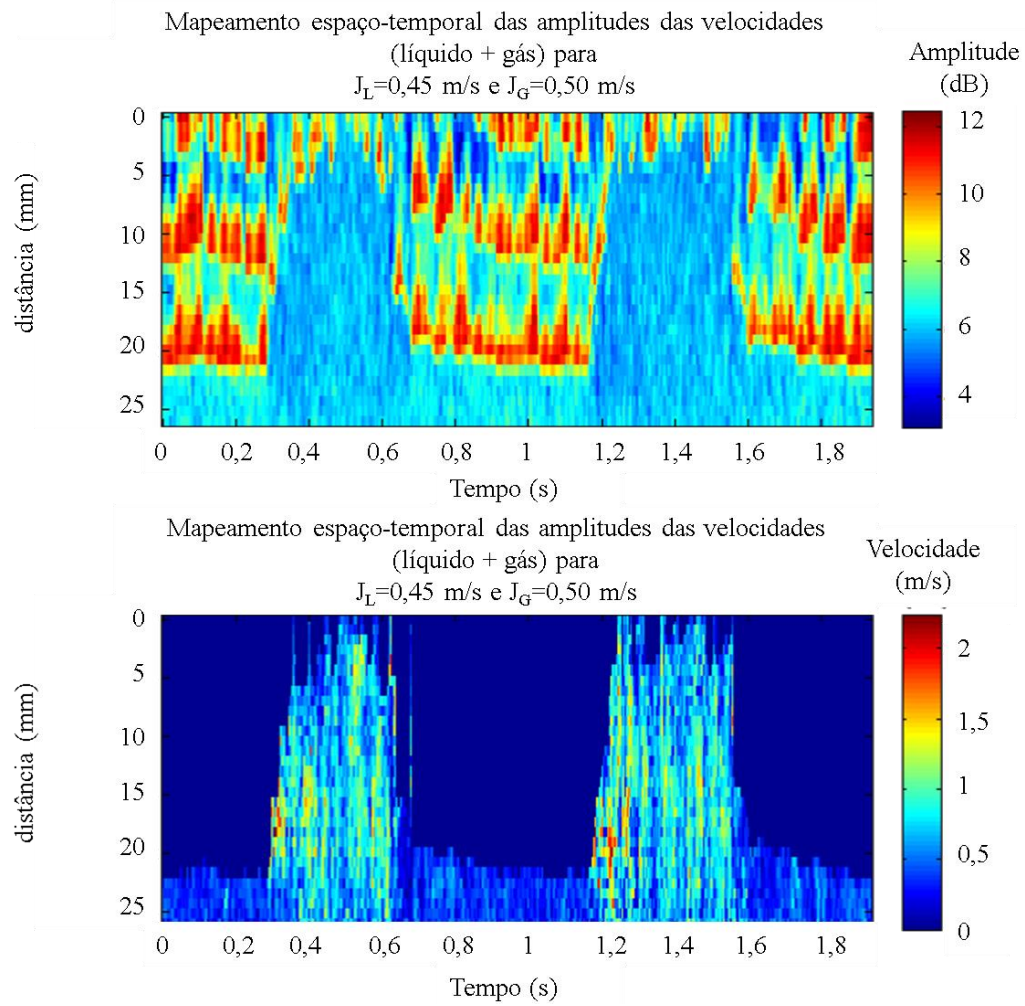


Figura 2.22. – O gráfico superior é um M-scan e o inferior um perfil de velocidade de um escoamento bifásico horizontal pistonado.

Os tipos de apresentação de dados de ultrassom mencionados nessa seção serão mencionados posteriormente durante esta tese para auxiliar na explicação de conceitos e resultados obtidos.

3 TÉCNICAS PARA PROCESSAMENTO DE DOPPLER ULTRASSÔNICO

O processamento do sinal de ultrassom para estimação de velocidade possui três etapas distintas: pré-processamento, estimação da velocidade e pós-processamento da velocidade. Na fase de pré-processamento, os dados são tratados para que os algoritmos de velocidade possam funcionar adequadamente. A próxima etapa consiste em estimar a velocidade dos refletores. Os estimadores por autocorrelação, correlação cruzada e autocorrelação estendida serão utilizados neste trabalho. Na etapa de pós-processamento, os valores de velocidade são filtrados com algoritmos que utilizam parâmetros estatísticos e físicos do experimento.

3.1 PRÉ-PROCESSAMENTO

O pré-processamento visa tratar os dados para que os algoritmos de estimação de velocidade tenham um melhor desempenho. Serão citados dois passos que são normalmente aplicados antes do processamento das velocidades. O primeiro deles é o ajuste do ganho do sinal de acordo com a distância dos ecos, por meio da compensação de ganho de tempo, também conhecido como TGC (do inglês, *time gain compensation*). Em seguida é aplicado um filtro para remoção de sinais que não sejam dos refletores imersos no escoamento, como por exemplo, ecos de parede.

3.1.1 Compensação de ganho de tempo

Os ecos de ultrassom naturalmente têm a sua energia atenuada conforme percorrem determinado meio. Para compensar a amplitude dos ecos mais distantes é utilizada a técnica de compensação de ganho de tempo. A Figura 3.1 ilustra o processo:

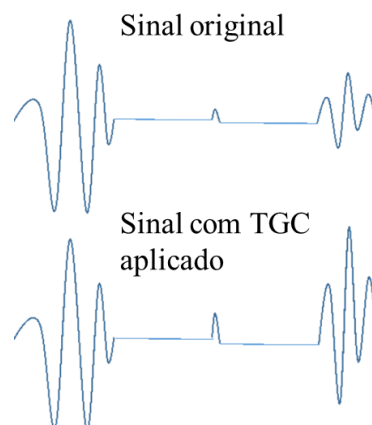


Figura 3.1. – Aplicação do TGC nos dados de ultrassom.

O ganho é ajustado de acordo com os dados experimentais obtidos. Em geral uma função de primeiro grau pode ser aplicada para aumentar o ganho gradativamente.

3.1.2 Filtro de ecos estacionários

Quando a medição por ultrassom ocorre externamente ao escoamento, sempre haverá reflexão devido às paredes do aparato experimental em que se insere o fluido. Como as paredes não se movem, os ecos são estacionários e, portanto, teriam velocidade zero caso fossem considerados pelo estimador de velocidade. Para que somente a informação relativa ao escoamento seja utilizada pelo algoritmo, é necessária a aplicação de filtros que eliminem essa componente de velocidade. Bjaerum *et al.* (2002) fizeram uma revisão dos diferentes filtros que podem ser utilizados. Dois tipos de filtros para cancelamento de ecos são comumente utilizados: filtro passa-alta e o filtro por regressão linear.

Os ecos de parede são sinais estacionários e serão idênticos em aquisições consecutivas. O espectro de frequência de um sinal diferencial constante é um valor de baixa frequência, que pode ser retirado com um filtro passa-alta. A Figura 3.2 exemplifica um espectro de frequência das paredes e do escoamento. Como a parede não se move seu espectro deve ser zero e os outros componentes com valores diferentes de zero.

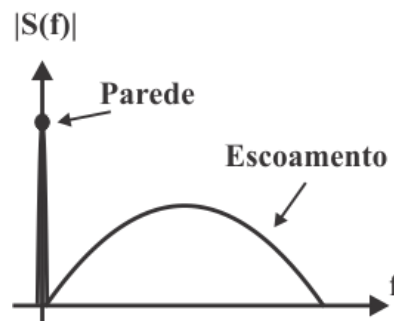


Figura 3.2. – Espectro de frequência da parede e do escoamento.

A função de transferência de um filtro passa-alta para cancelar ecos estacionários pode ser descrita pela equação (3.1) (JENSEN, J. A., 2006; SCHLAIKJER, 2001)

$$H_i(f) = \sum_{k=0}^{N_l-1} a_{k,i} \exp(-j2\pi(k-i)f/f_{sh}) \quad , \quad (3.1)$$

onde $a_{k,i}$ são os coeficientes do filtro, i é a linha (pulso) na qual o sinal do escoamento está sendo obtido, k é o número de linhas que entram no filtro, N_l é o número total de linhas e f_{sh} é um termo relacionado a velocidade axial v_r dada por

$$f_{sh} = \frac{c}{2v_r} f_{prf}. \quad (3.2)$$

O filtro tem implementação simples, porém em velocidades baixas a parede e os refletores no escoamento podem ter comportamento semelhante. Assim as velocidades baixas também seriam filtradas. Outra desvantagem do filtro passa alta é a diminuição da SNR do sinal.

As limitações do filtro passa-alta levaram a pesquisas de outras técnicas para cancelamento de ecos estacionários, como o de regressão linear proposto por Hoek *et al.*(1991). Ele se baseia no fato dos ecos das paredes formarem uma linha reta ao longo das várias emissões. A equação da regressão linear é:

$$y(t, l) = m_t + ls_t, \quad (3.3)$$

onde m_t é a média das amostras na profundidade definida pelo tempo de propagação t . O valor de l é representado por $-(N_l-1)/2..0..+(N_l-1)/2$, em que N_l é um número ímpar de linhas. A inclinação da reta é representada pela variável s_t dada como (SCHLAIKJER, 2001)

$$s_t = 4 \sum_{l=1}^{(N_l-1)/2} (r(t, l) - r(t, -l)) / (N_l^2 - 1). \quad (3.4)$$

Portanto a saída do filtro de cancelamento por regressão linear será:

$$r_{noeco}(t, l) = r(t, l) - y(t, l). \quad (3.5)$$

A Figura 3.3 mostra o efeito do filtro de ecos estacionários no sinal original de ultrassom. Na posição próxima de 11 mm do sinal original, existe uma múltipla reflexão. Esse sinal pode gerar velocidades próximas de zero. O sinal filtrado mostra o resultado obtido com o filtro de ecos estacionários em que a múltipla reflexão foi eliminada.

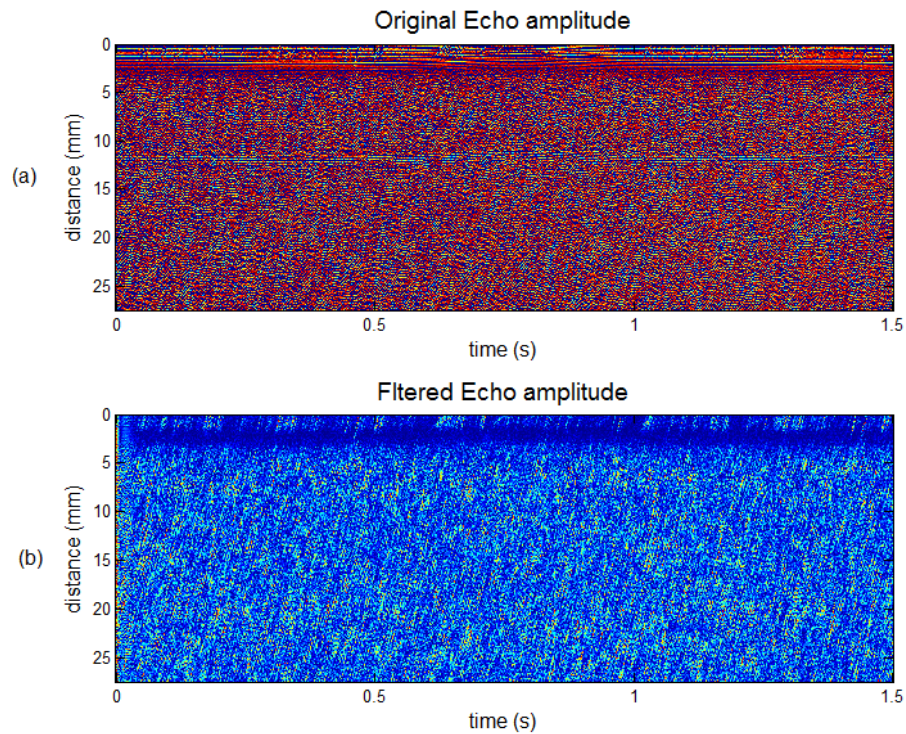


Figura 3.3. – M-Scan dos dados de ultrassom mostrando o resultado obtido pelo filtro passa altas para retirar os ecos estacionários. (a) Sinal original. Uma múltipla reflexão na posição 11mm pode gerar velocidades próximas de zero. (b) Sinal com filtro de eco estacionário. A múltipla reflexão foi removida.

3.2 ESTIMADORES DE VELOCIDADE

Os estimadores de velocidade utilizados neste trabalho serão detalhados nessa seção. A ideia básica de todos eles é encontrar a diferença de tempo ou de fase entre pulsos subsequentes para estimar a velocidade como mostrado na Figura 2.10 anteriormente. Pseudocódigos para implementação das técnicas podem ser encontradas no apêndice G deste trabalho.

3.2.1 Autocorrelação

O estimador de velocidade baseado na medição da fase por autocorrelação foi primeiramente proposto por Kasai (1985). O método utiliza os dados complexos em fase e quadratura, previamente demodulados em *hardware* ou *software*. A relação da fase de um sinal descrito como $r_s(t) = x(t) + jy(t)$ pode ser expressa da seguinte forma:

$$\varphi(t) = \arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right) = \arctan\left(\frac{\text{Im}\{r_s(t)\}}{\text{Re}\{r_s(t)\}}\right), \quad (3.6)$$

onde $\text{Im}\{\}$ representa a parte imaginária e $\text{Re}\{\}$ representa a parte real. A diferença de fase temporal é aproximada para forma discreta como:

$$\begin{aligned}\frac{d\varphi(t)}{dt} &\approx \frac{\Delta\varphi(i)}{\Delta i} \\ \frac{\Delta\varphi(i)}{\Delta i} &= \varphi(i) - \varphi(i-1) \\ \frac{\Delta\varphi(i)}{\Delta i} &= \arctan\left(\frac{y(i)}{x(i)}\right) - \arctan\left(\frac{y(i-1)}{x(i-1)}\right) \\ \frac{\Delta\varphi(i)}{\Delta i} &= \arctan\left(\frac{y(i)x(i-1) - y(i-1)x(i)}{x(i)x(i-1) + y(i)y(i-1)}\right)\end{aligned}\quad (3.7)$$

Os termos do numerador e do denominador da função arco tangente correspondem a parte imaginária e real da função discreta da autocorrelação complexa de atraso 1, como mostrado a seguir (JENSEN, J. A., 2006):

$$R(1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^N \sum_{j=1}^{N_s} r_c^*(i)r_c(i-1) \quad (3.8)$$

onde:

R : autocorrelação

r_c^* : complexo conjugado

Escrevendo os termos, a autocorrelação se desenvolve da mesma forma que a equação (3.7) como explicado anteriormente:

$$\begin{aligned}r_c^*(i)r_c(i-1) &= (x(i) - jy(i))(x(i-1) + jy(i-1)) \\ &= x(i)x(i-1) + y(i)y(i-1) \\ &= +j(y(i-1)(x(i) - x(i-1)y(i)))\end{aligned}\quad (3.9)$$

Para melhorar a precisão da técnica, é realizada uma média sobre o número de pulsos ou linhas N_l , envolvendo um número limitado de amostras N_{am} (SCHLAIKJER, 2001).

$$\hat{R}(1) = \frac{1}{(N_l - 1)N_{am}} \sum_{i=1}^{N_l-2} \sum_{j=1}^{N_{am}} r_c^*(i,j)r_c(i-1,j) \quad (3.10)$$

Combinando as equações (2.5), (3.6) e (3.10) a velocidade é estimada como:

$$v = \frac{cf_{prf}}{4\pi f_0} \arctan\left(\frac{Im\{\hat{R}(1)\}}{Re\{\hat{R}(1)\}}\right) \quad (3.11)$$

O método é um dos mais utilizados devido ao baixo custo computacional. O número de multiplicações $N_{mult,autocor}$ e somas $N_{som,autocor}$ necessárias para o cálculo de $\hat{R}(1)$, baseado na equação(3.10), é mostrado a seguir:

$$N_{mult,autocor} = 4N_{am}(N_l - 1) + 1$$

$$N_{som,autocor} = 3N_{som}(N_l - 1) \quad (3.12)$$

Essas equações serão comparadas posteriormente com os outros métodos de estimação de velocidade.

3.2.2 Correlação Cruzada

O método da correlação cruzada (CCM) tem sido substancialmente utilizado como ferramenta para investigar diversas aplicações na área de processamento de sinais envolvendo a estimação de diferença de tempo (BENDAT; PIERSOL, 1980). A técnica foi proposta para aplicação em ultrassom Doppler por Bonnefous e Pesque (1986) e estudada por outros autores como Jensen, (1993). O princípio de medição do CCM é ilustrado na Figura 3.4.

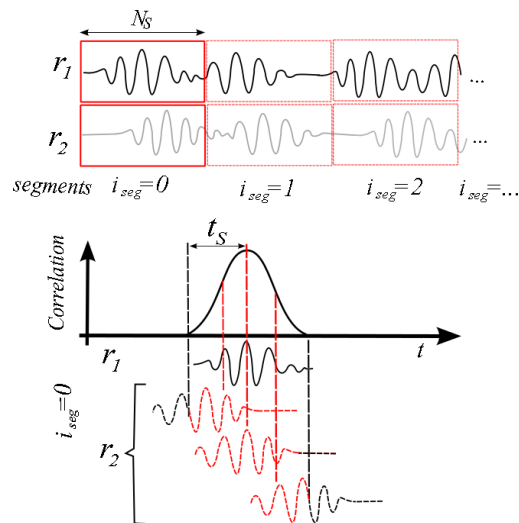


Figura 3.4. – Esquemático da técnica de correlação cruzada. As amostras são segmentadas para obter vetores velocidade em diferentes profundidades.

Os ecos de sucessivas emissões ultrassônicas são divididos em segmentos de tamanho N_s . Os sinais de ultrassom adquiridos em pulsos consecutivos são utilizados para calcular a correlação cruzada. O valor máximo da função de correlação é relacionado ao deslocamento temporal t_s . O cálculo da correlação cruzada discreta é dada por Jensen(2006):

$$R_{12}(n, i_{seg}) = \frac{1}{N_s} \sum_{k=0}^{N_s-1} r_i(k + i_{seg}N_s)r_{i+1}(k + i_{seg}N_s + n) \quad (3.13)$$

Como o sinal é amostrado em tempos discretos, o valor máximo da correlação pode não ser o verdadeiro pico do sinal real. Para garantir uma maior precisão, o CCM depende de uma alta taxa de amostragem, penalizando o desempenho computacional devido ao grande número de operações matemáticas.

Da mesma forma que o estimador de autocorrelação, uma média sobre o número de pulsos ou linhas N_l envolvendo um número limitado de amostras N_s é realizada para melhorar a precisão da técnica (JENSEN, J. A., 2006).

$$\hat{R}_{12}(n, i_{seg}) = \frac{1}{N_s(N_l - 1)} \sum_{i=0}^{N_l-2} \sum_{k=0}^{N_s-1} r_i(k + i_{seg}N_s)r_{i+1}(k + i_{seg}N_s + n) \quad (3.14)$$

A velocidade máxima que a técnica permite calcular depende do número de amostras e da frequência de aquisição (JENSEN, J. A., 2006).

$$v_{max} = \frac{c}{2} N_s \frac{f_{prf}}{f_s} \quad (3.15)$$

A velocidade mínima, que corresponde à resolução da técnica, é obtida quando $N_s=1$ como mostra a equação a seguir:

$$v_{min} = \frac{c}{2} \frac{f_{prf}}{f_s} \quad (3.16)$$

O custo computacional da correlação cruzada é o ponto fraco da técnica, que depende do número de amostras N_{am} , o número de linhas ou pulsos N_l , e o número de amostras que representam a diferença temporal entre os sinais N_{ts} . Assim, o número de multiplicações $N_{mult,corcruz}$ e somas $N_{som,corcruz}$ necessárias para o cálculo de $\hat{R}(1)$, baseado na equação (3.13), é mostrado a seguir:

$$N_{mult,corcruz} = N_{am}(N_l - 1)N_{ts}$$

$$N_{som,corcruz} = (N_{am} - 1)(N_l - 1)N_{ts} \quad (3.17)$$

Em alguns casos é necessário interpolar o sinal para melhorar a precisão. Desta forma, o custo computacional é aumentado significativamente, pois o aumento de amostras influencia diretamente as variáveis N_{ts} e N_{am} . A equação (3.17), comparada a equação (3.12), permite concluir que o esforço computacional do CCM é muito maior do que do ACM.

Uma outra característica que difere o CCM do ACM é o tipo de pulso necessário para excitar o transdutor de ultrassom. Como o CCM mede a diferença de tempo e não de fase como o ACM, é preferível que o pulso seja de banda larga (pulso curto) para facilitar a localização do máximo da função de correlação. Nesse sentido, o uso de um pulsador END é vantajoso pois tem como característica a geração de pulsos de banda estreita. A Figura 3.5 mostra os gráficos de resposta de dois tipos de transdutores fabricados pela Olympus. O transdutor do tipo Acuscan tem banda de frequência estreita e seria ideal para medição de fase. O transdutor do tipo Videoscan tem a banda larga de frequências, dificultando a medição de fase, porém facilitando a estimação mais precisa do tempo devido ao pico bem definido do sinal no tempo. Portanto a escolha do tipo de transdutor influencia diretamente na performance do estimador de velocidade.

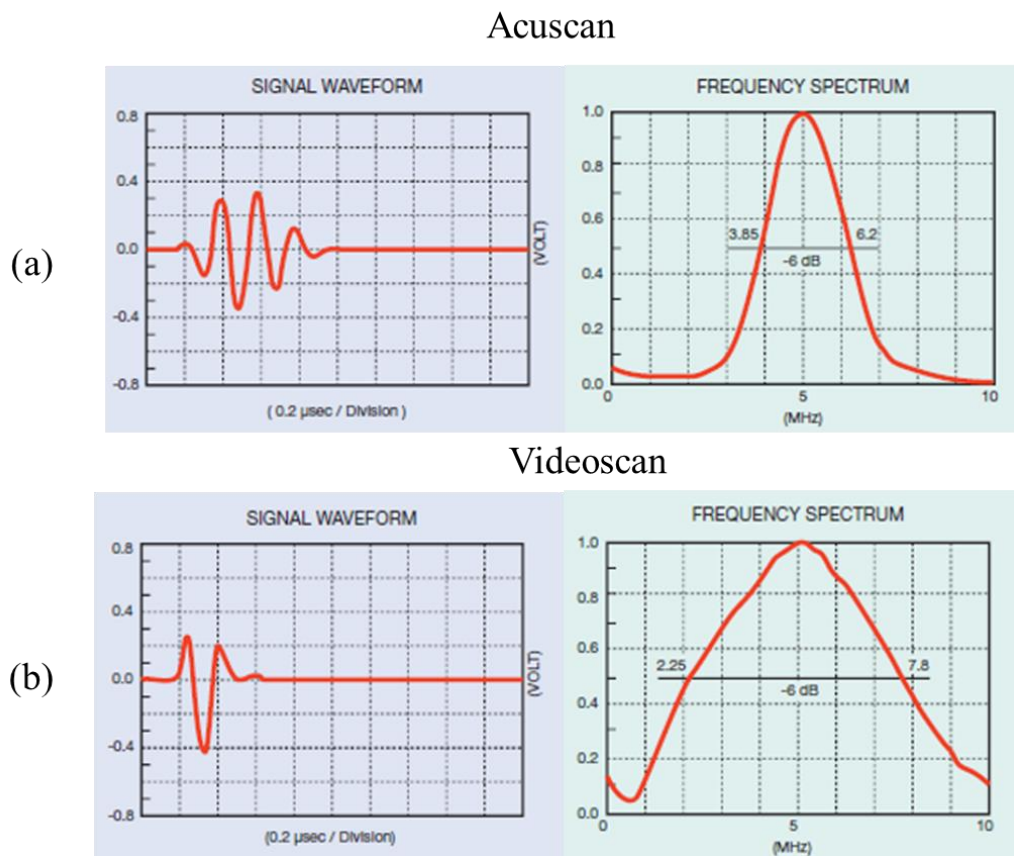


Figura 3.5. – Transdutores da Olympus de com diferentes bandas de frequência. (a) Acuscan, de banda estreita e resposta temporal com vários ciclos de onda. (b) Videoscan, de banda larga e um pulso curto de poucos ciclos de onda. Fonte: (OLYMPUS, 2014a)

3.2.3 Autocorrelação estendida

O estimador por autocorrelação é o mais utilizado em equipamentos comerciais, devido ao seu baixo custo computacional, porém ele sofre com o problema de *aliasing* em

velocidades mais altas. Para superar essa limitação, Lai e Torp (1997) propuseram um novo estimador que combina a autocorrelação e a correlação cruzada para estimar a velocidade sem o problema de *aliasing*, chamado de método da autocorrelação estendida (EAM). A Figura 3.6 mostra um esquema de como a técnica funciona:

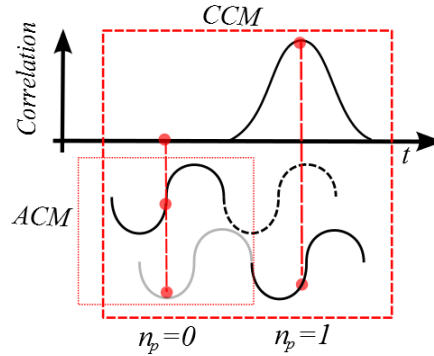


Figura 3.6. – Desenho esquemático da técnica de Autocorrelação Estendida.

Inicialmente o estimador por autocorrelação é aplicado para detectar a diferença de fase entre pulsos consecutivos. Caso exista *aliasing*, a fase será defasada de um valor múltiplo de 2π como mostra a equação

$$\varphi_{real} = \varphi_{autocorrelação} + n_p 2\pi, \quad (3.18)$$

onde: $n_p = [\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots]$.

Nesse universo limitado de valores de n_p , a correlação cruzada, que não possui problemas com *aliasing*, é utilizada então para determinar qual o melhor valor e consequentemente obter o verdadeiro deslocamento de fase. Desta forma, o custo computacional é reduzido evitando a multiplicação de todas as amostras.

O custo computacional pode ser estimado pelas equações (3.18) e (3.19) substituindo o número de amostras da diferença temporal N_t pelo número total de possíveis valores de n_p definido como N_p .

$$\begin{aligned} N_{mult,EAM} &= 4N_{am}(N_l - 1) + 1 + N_{am}(N_l - 1)N_p \\ N_{som,EAM} &= 3N_{am}(N_l - 1) + (N_{am} - 1)(N_l - 1)N_p \end{aligned} \quad (3.19)$$

Como $N_p \ll N_{dt}$ o estimador por autocorrelação estendida é muito mais eficiente do que a correlação cruzada.

O EAM combina as características do ACM e do CCM, e isto também influencia nos tipos de pulso desejáveis a técnica. O ACM precisa de pulsos largos e o CCM precisa de pulsos estreitos para uma melhor correlação dos sinais. Portanto, é necessário um número mínimo de

ciclos para calcular a fase, mas também um pico de sinal bem definido, para possibilitar que a correlação cruzada corrija a fase satisfatoriamente.

Na área de fluidodinâmica, os equipamentos de ultrassom operam com o método da autocorrelação em tempo real ou os dados são processados *off-line* utilizando a correlação cruzada (devido ao tempo de processamento). Assim, este trabalho propõe o uso da autocorrelação estendida para possibilitar a medição de velocidades mais altas (sem *aliasing*) em tempo real. Além de ser uma solução inovadora na área, o EAM é atualmente a única forma de medir velocidades mais altas utilizando um pulsador END, pois outras técnicas como *staggered PRF* necessitam de um *hardware* específico. Um sistema que utiliza essa configuração será mostrado posteriormente no capítulo 4.

3.3 PÓS-PROCESSAMENTO

Pela mecânica dos fluidos, a velocidade em um determinado ponto de um escoamento não pode ser muito diferente de um ponto adjacente no espaço ou no tempo. As transições ocorrem de forma gradual, sem grandes diferenças em velocidades vizinhas. Essa característica pode ser utilizada em filtros de pós-processamento para suavizar variações grandes de velocidade.

Em processamento de imagens o filtro não-linear de mediana é amplamente utilizado para suavizar ruídos do tipo impulso. Os algoritmos para estimação de velocidade podem apresentar pontos de velocidade fora da normalidade, principalmente por conta de ruídos, o que torna interessante o uso do filtro de mediana (SCHLAIKJER, 2001). A ideia consiste em tomar um conjunto de valores e reordená-los de forma crescente resultando como saída o valor central do conjunto reordenado. No exemplo mostrado na Figura 3.7 o valor 10 é substituído pelo valor central do conjunto.

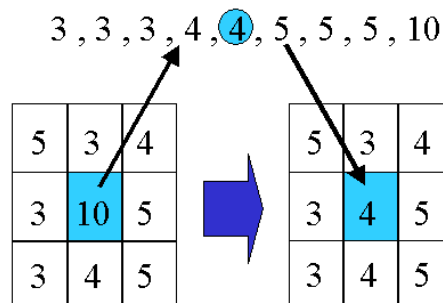


Figura 3.7. – Exemplo de filtro de mediana aplicado.

Desta forma, o filtro de mediana é utilizado neste trabalho para retirar valores atípicos (*outliers*) da matriz de velocidades, melhorando os resultados obtidos.

4 DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO E VALIDAÇÃO DA TÉCNICA DA AUTOCORRELAÇÃO ESTENDIDA UTILIZANDO PULSADORES DE END

4.1 PULSADOR PARA ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS APLICADOS A MEDIÇÃO DE VELOCIDADE

Na área de ultrassom END existem pulsadores/receptores mais simples, que possibilitam o uso da técnica ultrassônica a um relativo baixo custo. Com o uso de transdutores apropriados e um sistema de aquisição (osciloscópios ou digitalizadores), esses pulsadores proporcionam uma solução ultrassônica inicial para detecção de defeitos em peças, medição de espessura e caracterização de materiais na área de END. O uso desses pulsadores pode também ser interessante para a medição de velocidade como proposto neste trabalho. Dois tipos de pulsadores podem ser encontrados na área de END: pulsadores-receptores tipo pico (Spike) e pulsadores-receptores tipo onda quadrada. O primeiro, do tipo pico, foi desenvolvido para ensaios não destrutivos em materiais finos. O pulsador tipo onda quadrada tem seu uso voltado a materiais mais espessos ou com alto coeficiente de atenuação. Essa característica é desejável para a área de medição de velocidade, pois em muitas aplicações o sinal de ultrassom é altamente atenuado devido a interfaces sólido-líquido em medições não intrusivas (tubulações), devido à profundidade de medição (canais abertos) ou devido ao espalhamento do sinal por excesso de refletores (bolhas/partículas).

Pulsadores END do tipo onda quadrada geram um degrau de tensão negativa, que, depois de um certo período, retorna ao seu valor original. O usuário pode controlar o período e conseqüentemente a frequência da onda quadrada e também seu valor de tensão. O espectro de frequência nesse tipo de pulsador é conhecido como uma função sinc que em baixas frequências tem uma resposta plana e em altas frequências possui um decaimento com zeros a cada $1/f$. Para otimizar a transferência de energia do pulsador para o transdutor, o fabricante (Olympus) sugere que o pulso gerado seja metade do período da onda de ultrassom. A Figura 4.1 mostra o sinal gerado por um pulsador tipo onda quadrada modelo 5077PR da Olympus e seu espectro de frequência (FFT) obtido por um Osciloscópio modelo MSO7000 da Keysight. Os pulsos foram ajustados para a metade da frequência de supostos transdutores com 2,25, 4, 10 e 15 MHz de frequência central. O gráfico mostra duas características dos pulsadores de onda quadrada. Primeiro, a amplitude da FFT na região da frequência desejada tem um perfil plano e com ganho alto. Segundo, conforme a frequência aumenta (pulso mais curto) a energia do sinal diminui consideravelmente. Segundo o fabricante, o uso de pulsadores de onda quadrada tem uma boa

performance para transdutores de 10 MHz ou menos. Nessa faixa de frequência o ganho de sinal por chegar até a 12 dB se comparado a pulsadores do tipo pico. Além disso, a maior parte das aplicações para medição de perfil de velocidade utilizam transdutores nessa faixa de frequência.

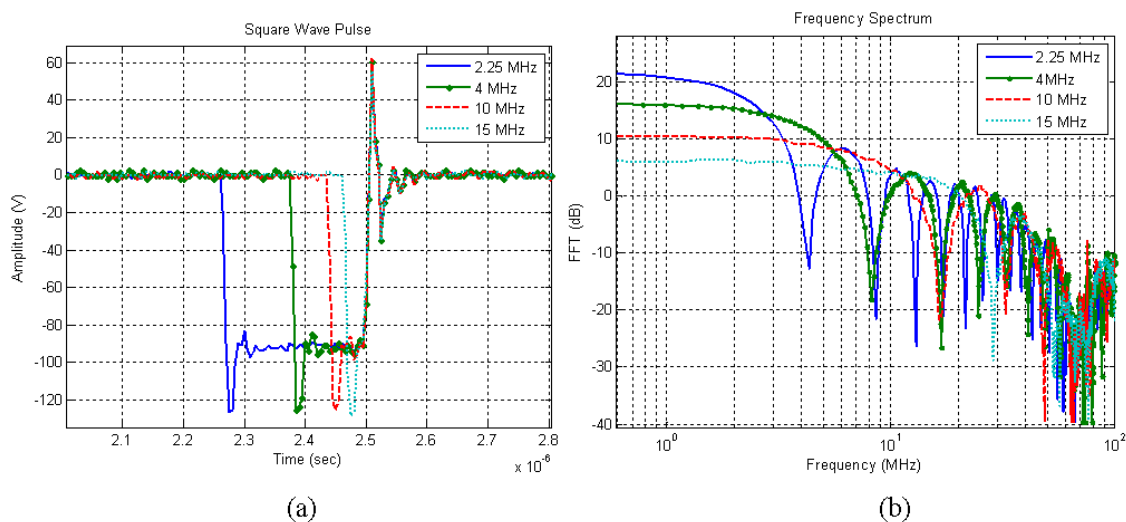


Figura 4.1. – Resposta de um pulsador tipo onda quadrada ajustado para transdutores de frequências de 2,25, 4, 10 e 15 MHz. (a) Onda quadrada gerada observada no tempo. (b) Espectro de frequência.

Com relação ao processamento de sinais para medição de velocidade, o ACM necessita de vários ciclos (sinal de banda estreita) para melhor estimar a diferença de fase entre os pulsos. Takeda (2012) sugere de 4 a 8 ciclos para garantir uma boa medição. Por outro lado, o CCM precisa de sinais com picos bem definidos para que a correlação cruzada estime corretamente a diferença entre pulsos. Como mencionado no capítulo anterior, o EAM precisa das características de pulso de ambas as técnicas ACM e CCM, um número mínimo de ciclos para calcular a fase, mas também um pico bem definido, para a correlação cruzada corrigir a fase satisfatoriamente. A Figura 4.2 mostra um pulso de ultrassom gerado pelo pulsador END de onda quadrada utilizado um transdutor de 4 MHz da Met-Flow SA. Foi gerado um sinal com quatro ciclos e com um pico bem definido. Essa condição atende os critérios de medição do EAM e ao mesmo tempo também atendem os critérios do ACM e do CCM. Desta forma, o uso do pulsador de END com um transdutor apropriado pode resultar em pulsos adequados para todas as técnicas de medição.

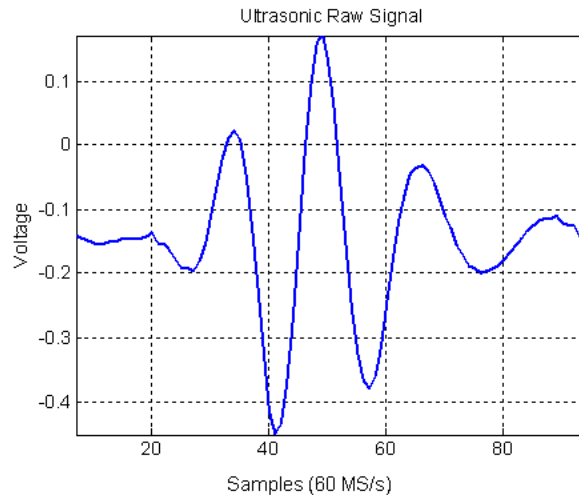


Figura 4.2. – Sinal de ultrassom de um eco de parede.

4.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO EM TEMPO REAL DE DADOS ULTRASSÔNICOS

Para geração e recepção dos pulsos ultrassônicos foi utilizado um pulsador Olympus modelo 5077PR. A gravação dos dados se deu com um sistema de aquisição da National Instruments (NI PXI 5105) a uma taxa de amostragem de 60 MS/s (mega-amostras por segundo). Um computador Intel®Core™ i7-3770 3,4 GHz com 24 Gb de RAM com o software Matlab foi utilizado para processar o sinal.

Um software foi desenvolvido para controlar a aquisição dos dados e para visualização de parâmetros em tempo real como *A-Scan*, *M-Scan* e medidas de velocidade. A linguagem utilizada foi o LABVIEW. Um módulo adicional chamado de *MathScript Real Time* possibilitou o uso de scripts matemáticos (arquivos .m) para o processamento dos sinais em tempo real. A Figura 4.3 mostra o diagrama em blocos do software.

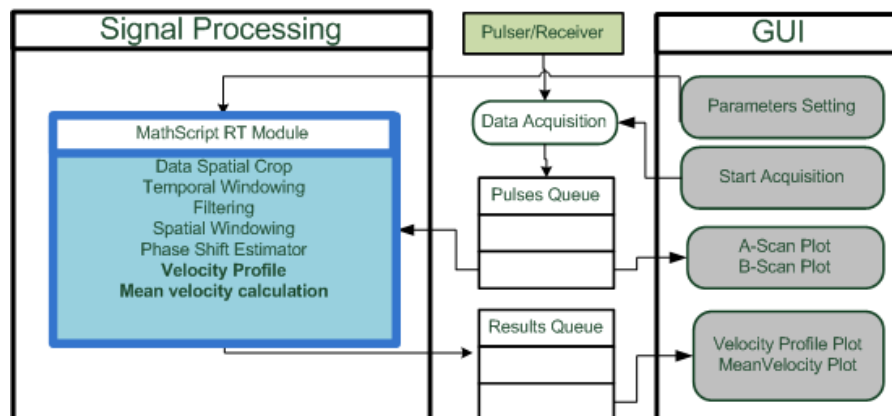


Figura 4.3. – Diagramas em blocos do *software*

Primeiramente os parâmetros de interesse são inicializados pela interface gráfica (GUI). Quando a aquisição é iniciada, o digitalizador começa a receber os dados do pulsador que entram em uma fila de pulsos utilizada pelos módulos de processamento, A-Scan e B-Scan. Os dados processados pelo módulo *MathScript* são colocados na fila de resultados. Por fim, os resultados de perfil de velocidade e velocidade média são mostrados na interface gráfica em tempo real. A Figura 4.4 mostra a tela do *software*.

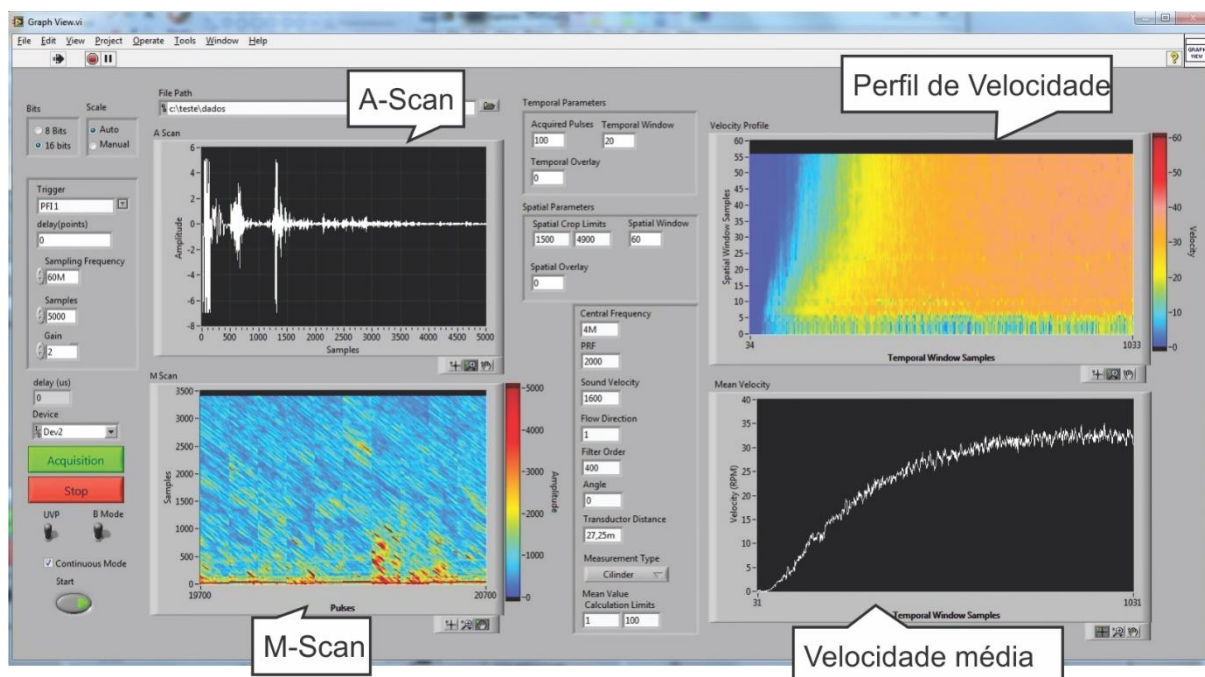


Figura 4.4. – Tela do *software* desenvolvido.

O sistema também possibilita gatilhos de entrada e saída para sincronização com outros equipamentos como câmeras de alta velocidade. O bloco principal do programa LabView desenvolvido pode ser encontrado no apêndice F deste trabalho.

4.3 VALIDAÇÃO DA TÉCNICA DE AUTOCORRELAÇÃO ESTENDIDA EM UM CILINDRO GIRANTE

Para validar a técnica da autocorrelação estendida foi utilizado o experimento do cilindro girante proposto por Takeda (1991). A velocidade do líquido dentro do cilindro possui solução analítica simples e estável, ideal para verificar a precisão dos estimadores de velocidade. O perfil de velocidade medido é uma linha reta como mostra a Figura 4.5:

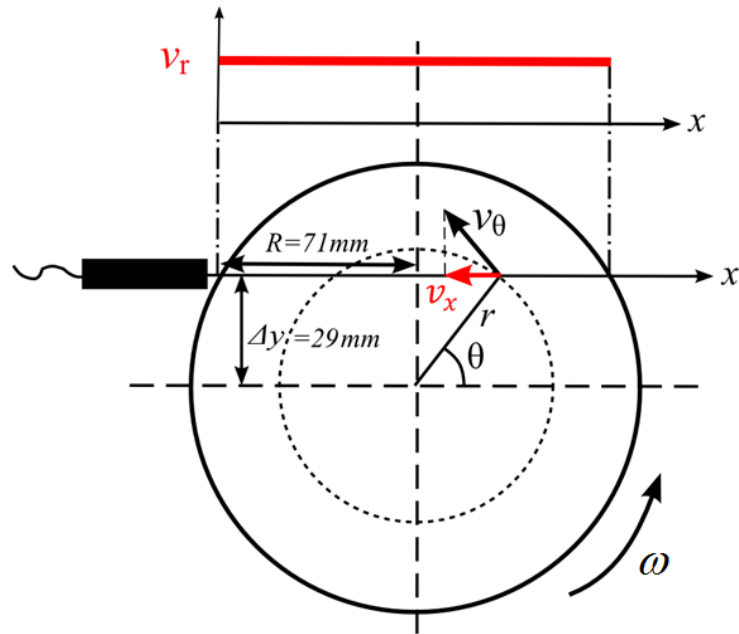


Figura 4.5. – Perfil de velocidade medida no cilindro girante.

A velocidade medida v_x está no campo acústico (em linha reta) gerado pelo transdutor ultrassônico. Utilizando relações trigonométricas, v_x é relacionado à velocidade angular ω por:

$$v_x = \omega \Delta y \quad (4.1)$$

onde Δy é a distância entre o transdutor e o centro do cilindro (29 mm). O completo aparato experimental é descrito na Figura 4.6:

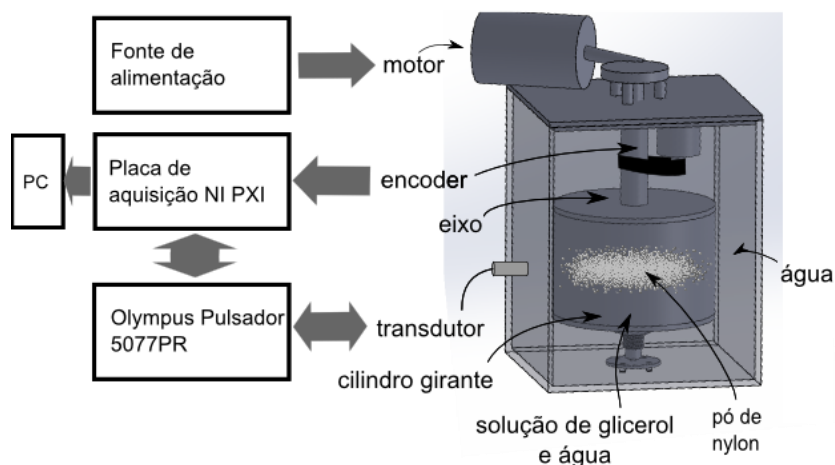


Figura 4.6. – Esquemático do aparato experimental para medição de velocidade em um cilindro giratório.

Um cilindro girante preenchido com uma solução de água/glicerol e partículas traçadoras de Nylon com diâmetros entre 80 e 200 μm (Modelo 1A P82 da EMS Griltech) e densidade de 1,07 gramas por litro. Um motor elétrico foi utilizado para girar o cilindro, cuja

velocidade de rotação foi monitorada por um sensor do tipo Encoder. O pulsador END foi configurado para disparar 2000 pulsos por segundo a uma tensão de 100V. Um transdutor de 4 MHz da Met-Flow SA foi utilizado. O sistema de aquisição, citado na seção anterior, foi configurado para aquisição de 16000 pulsos (8 segundos).

4.3.1 Metodologia de medição

Para avaliar os resultados obtidos com o pulsador END, e também a capacidade do estimador de velocidade por EAM de medir velocidades acima do limite de Nyquist, foram realizadas comparações entre as técnicas citadas ACM, CCM e EAM com a velocidade medida pelo sensor tipo Encoder, que será a referência nos testes. O desvio quadrático médio S_{rms} normalizado pelo valor médio da velocidade obtido pelo sensor tipo Encoder, será usado como critério de comparação. A equação (4.2) mostra como o desvio é obtido.

$$S_{rms} = \frac{100\%}{\bar{v}_c} \frac{1}{DT} \sqrt{\sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D (v_{us}(d, t) - v_c(t))^2} \quad (4.2)$$

onde D é o número de amostras na profundidade, T é o número de amostras temporais, $v_{us}(d, t)$ é a velocidade estimada no tempo t e profundidade d e a velocidade médio do cilindro é representada por \bar{v}_c .

A velocidade máxima mensurável pela técnica da autocorrelação, restringida pelo limite de Nyquist, foi calculada como 212 mm/s de acordo com a equação (2.6). Baseado nesse limite foram escolhidas velocidades menores e maiores do que 212 mm/s para avaliar o EAM. Também será avaliado o custo computacional de cada técnica.

Em um segundo teste, foi proposto aumentar a velocidade de rotação do fluido para avaliar a máxima velocidade mensurável pelo EAM. Desta forma, será determinado o número máximo de vezes em que o limite de Nyquist pode ser ultrapassado de acordo com o valor de n_p da equação (3.18). Porém, devido à restrição do motor utilizado, isso não foi possível. Uma forma de contornar essa limitação, foi reduzir a frequência de repetição de pulsos f_{prf} , reduzindo a amostragem no tempo dos dados. De acordo com a equação (2.6), o valor da máxima velocidade mensurável também é reduzido. Assim, mesmo mantendo a velocidade original, é possível que ela esteja muitas vezes acima do limite de Nyquist.

Em um último teste, a taxa de amostragem dos dados será reduzida para avaliar qual a taxa mínima para se obter uma medição de velocidade razoável. Uma taxa de amostragem menor reduz o custo computacional e facilita as medições em tempo real. Como os dados foram

adquiridos digitalmente, será utilizado um método semelhante a sub amostragem dos dados de frequência de repetição de pulsos. Porém, a sub amostragem dos sinais será aplicada nas amostras de profundidade, reduzindo a taxa de 60 MS/s para 30, 20, 10, 8 e 6 MS/s.

4.3.2 Resultados

Os gráficos do perfil de velocidade média em função da distância estão descritos na Figura 4.7. As velocidades obtidas por ACM, CCM e EAM foram comparados a velocidade média medida pelo Encoder. A Tabela 4.1 mostra uma comparação entre cada técnica das velocidades médias obtida em todo o perfil. O desvio médio quadrático é utilizado para comparar as diferentes técnicas. Todos os estimadores apresentaram desvios menores do que 2% para velocidades dentro do limite de Nyquist. Para velocidades acima do limite de Nyquist, o ACM sofre de *aliasing* e as velocidades não são medidas corretamente. EAM e CCM medem corretamente, também com 2% de desvio quadrático médio.

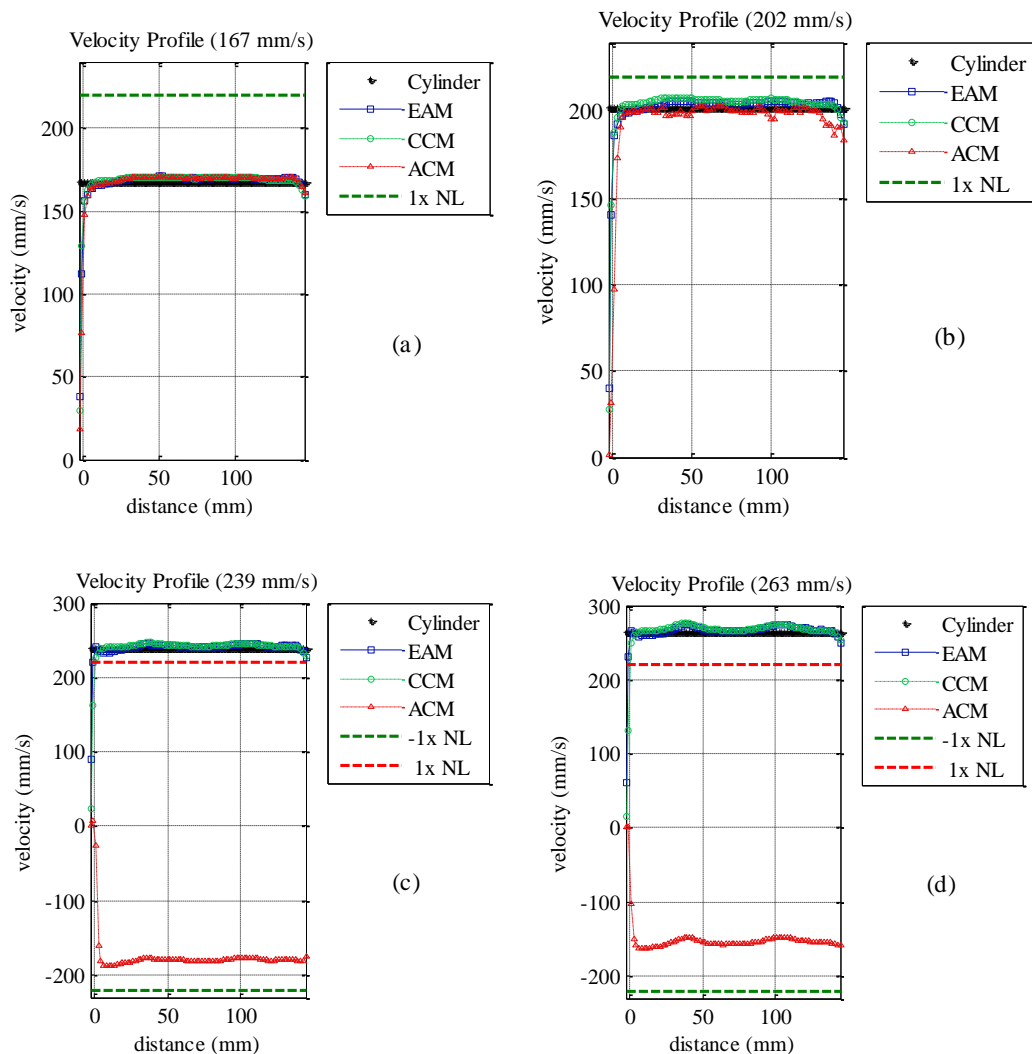


Figura 4.7. – Perfil de Velocidade para um conjunto de velocidades medidos por ACM, CCM e EAM. (a) Velocidade de 167 mm/s, abaixo do limite de Nyquist. (b) Velocidade de 202 mm/s, abaixo do limite de

Nyquist. (c) Velocidade de 239 mm/s, acima do limite de Nyquist. (d) Velocidade de 263 mm/s, acima do limite de Nyquist.

Tabela 4.1. Resumo das velocidades encontradas

Encoder	Velocidade média (mm/s)					
	ACM		EAM		CCM	
v	v	$S_{rms}(\%)$	v	$S_{rms}(\%)$	v	$S_{rms}(\%)$
168	165	0.7	167	1.5	168	0.9
202	200	1.3	209	1.4	198	0.6
239	-185	---	239	1.5	243	0.8
263	-159	---	263	1.3	263	1.4

Para exemplificar o efeito de *aliasing*, a Figura 4.8 mostra o gráfico comparativo do deslocamento de fase encontrado pelo ACM e pelo EAM, para a velocidade de 239 mm/s. Apesar dos pontos estarem no mesmo local o valor médio é maior no EAM devido ao acréscimo de n vezes $2\pi/360^\circ$.

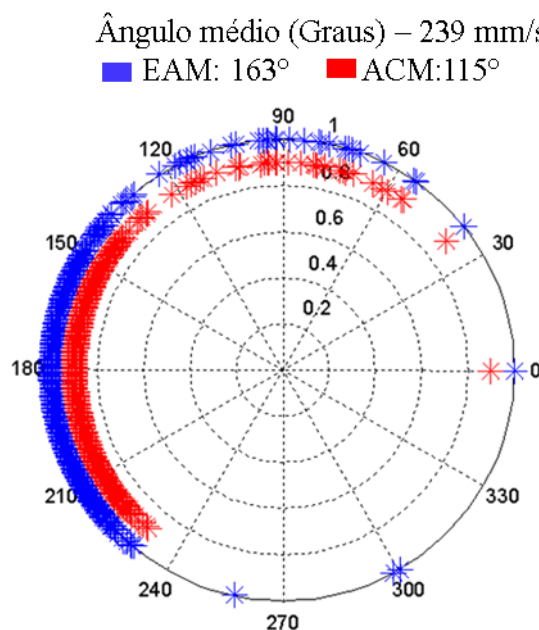


Figura 4.8. – Comparação entre a fase encontrada pelo ACM e o EAM.

4.3.3 Esforço Computacional

A Tabela 4.2 mostra a comparação entre o esforço computacional entre as três técnicas. O método da autocorrelação, por ser o mais rápido, será utilizado como referência comparativa. O método da correlação cruzada é o mais lento, pois necessita de mais operações matemáticas. A autocorrelação estendida obteve desempenho intermediário, 55 vezes mais lenta do que o ACM, mas 9 vezes mais rápido do que o CCM.

Tabela 4.2. Esforço computacional dos estimadores de velocidade.

Relação de esforço computacional entre os estimadores			
Velocidade (mm/s)	EAM/ACM	CCM/ACM	CCM/EAM
167	54	488	9
202	56	525	9
239	55	500	9
263	56	503	9

Os resultados mostram que o pulsador END de onda quadrada é compatível com a técnica de medição de perfil de velocidade utilizando a medição de fase (ACM/EAM) ou medição de tempo (CCM/EAM). Os pulsos gerados possibilitaram resultados com baixo desvio médio quadrático. O estimador por autocorrelação estendida foi validado e pode medir velocidades acima do limite de Nyquist como o CCM, porém, com um tempo computacional muito menor.

4.3.4 Velocidade máxima mensurável

Na seção anterior o EAM foi comparado ao ACM e ao CCM para velocidades acima de apenas uma vez o limite de Nyquist. Velocidades maiores não foram avaliadas devido a limitação do motor utilizado. Uma alternativa para avaliar a velocidade máxima mensurável pelos estimadores de velocidade, é diminuir a frequência de repetição de pulsos de acordo com a equação (2.6). Isso pode ser realizado de maneira simples, sub amostrando o sinal original. A frequência de 2000 pulsos por segundo pode ser dividida por um fator de decimação, que neste trabalho foi variado de 2 a 8 vezes. A Figura 4.9 mostra o perfil de velocidade medido em duas velocidades diferentes (167 mm/s e 239 mm/s), com um fator de decimação em três vezes (f_{prf} de 667 Hz). Nessa condição o ACM não mede as velocidades corretamente, e, devido aos diferentes limites de Nyquist entre a Figura 4.9a e a Figura 4.9b, a velocidade medida troca de sinal devido ao *aliasing*. As velocidades são corretamente medidas por EAM e CCM, com uma melhor performance do CCM conforme observado na Figura 4.9b.

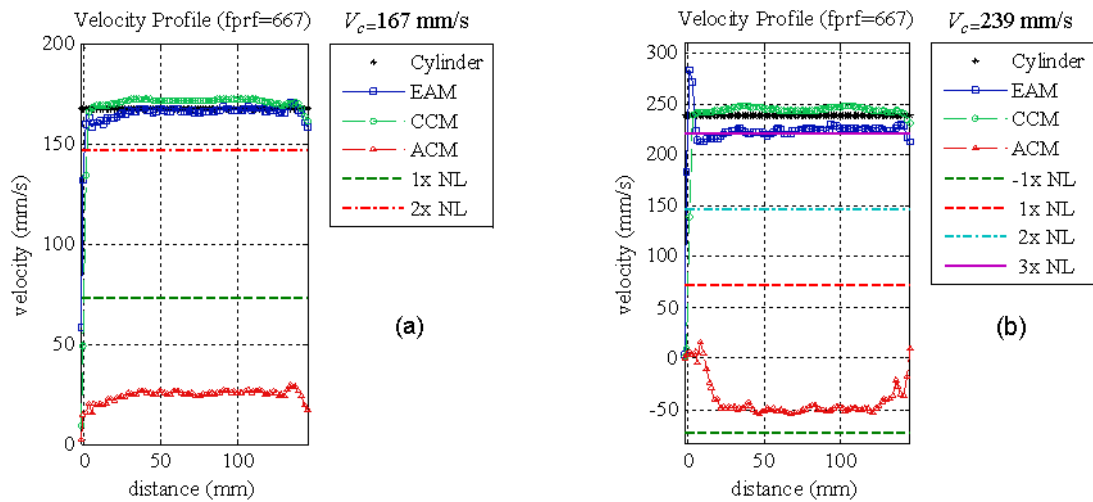


Figura 4.9. – Perfil de velocidade para dados sub amostrados por um fator de três. (a) Velocidade do cilindro de 167 mm/s, acima de duas vezes o limite de Nyquist. (b) Velocidade do cilindro de 239 mm/s, acima de três vezes o limite de Nyquist.

Os testes foram realizados até a velocidade superar o limite de Nyquist em sete vezes. Nessa condição nenhuma técnica pode medir a velocidade do cilindro conforme mostra a Figura 4.10.

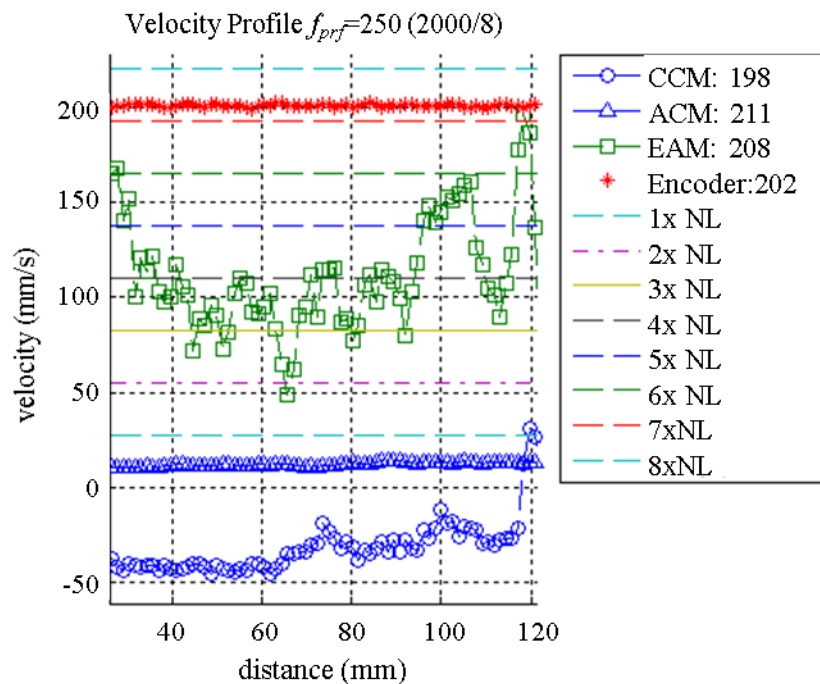


Figura 4.10. – Perfil de velocidade acima de 7 vezes o limite de Nyquist.

Uma análise completa das quatro velocidades medidas (167, 202, 239 e 263 mm/s) em condições distintas de frequência de repetição de pulsos é mostrada na Tabela 4.3. As velocidades superam o limite de Nyquist de zero até sete vezes, conforme mostra a tabela de cores do lado direito da tabela.

Tabela 4.3. Desvio médio quadrático para os estimadores EAM e CCM para velocidades acima do limite de Nyquist. As cores indicam o número de vezes que a velocidade ultrapassa o limite de Nyquist.

f_{prf} (Hz)	EAM S_{rms} (%)				CCM S_{rms} (%)				<n> vezes acima de N_L
	Velocidade do cilindro (mm/s)								
	167	202	239	263	168	202	239	263	
2000	1,5	1,4	1,5	2,1	0,7	1,4	1,1	2,0	0×
1000	1,0	1,5	1,2	1,5	1,0	1,2	1,3	2,2	1×
667	0,9	2,4	6,3	4,1	1,5	1,3	1,4	2,3	2×
500	1,9	7,7	5,8	7,0	1,4	1,4	1,5	2,3	3×
400	2,8	5,6	15,3	12,6	1,4	1,5	1,5	2,3	4×
333	5,8	15,0	10,4	-	1,5	1,4	1,5	-	5×
286	16,5	10,0	-	-	1,4	1,4	-	-	6×
250	11,2	-	-	-	1,4	-	-	-	7×

Os resultados mostram que a precisão da velocidade depende do limite de Nyquist, mesmo para as diferentes velocidades testadas. O erro aumenta conforme a frequência de repetição de pulsos é reduzida, aumentando o limite de Nyquist. Para velocidades acima até três vezes o limite de Nyquist, o EAM mede tão bem quanto o CCM. Após quatro vezes o limite de Nyquist o EAM tem seu resultado degradado, enquanto que o CCM mantém o baixo desvio. Para o caso de a velocidade estar acima de sete vezes o limite de Nyquist nenhuma técnica consegue realizar uma medição correta. Assim, para experimentos futuros, foram constatados possíveis limites de velocidade mesmo para as técnicas de EAM e CCM.

4.3.5 Taxa mínima de amostragem de dados

O sinal de ultrassom é adquirido pelo sistema de aquisição a uma taxa de amostragem de 60 MS/s. Essa velocidade está relacionada a quantidade de pontos utilizados para reconstruir o sinal real. Desta forma, quanto mais pontos, mais fidedigno é o dado digitalizado, porém maior é o tamanho do arquivo gerado e também mais demorado é o processamento destes dados. Para avaliar a performance dos estimadores de velocidade, foi realizado um experimento variando a taxa de amostragem do sistema em 40, 30, 20, e 10 MS/s. Isto foi possível decimando os dados originais.

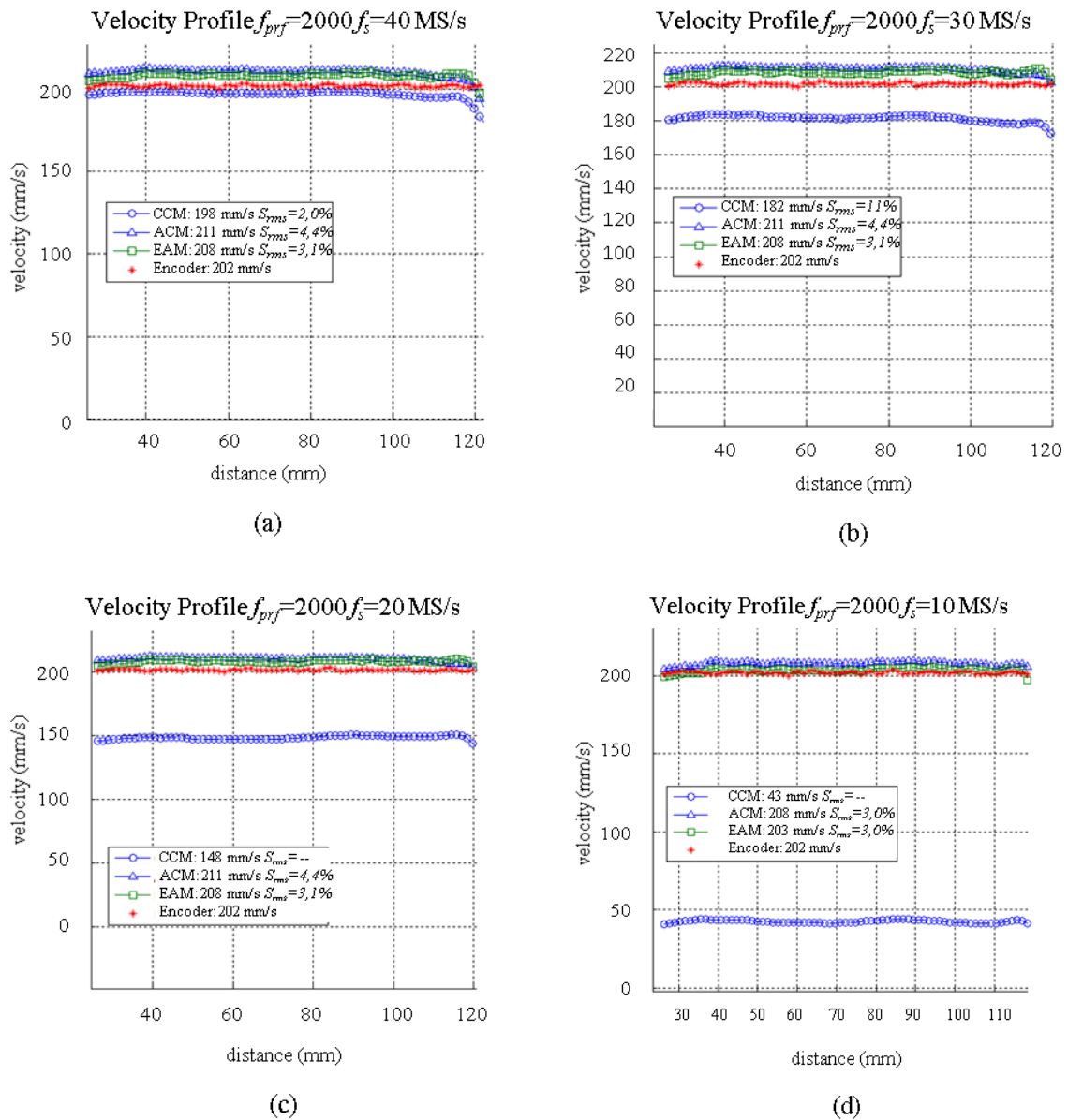


Figura 4.11. – Perfis de velocidade em diferentes taxas de amostragem. (a) 40 MS/s (b) 30 MS/s (c) 20 MS/s (a) 10 MS/s.

O experimento indica que até 10 MS/s, a velocidade mensurada pelo EAM e pelo ACM se mantém a erros menores do que 5%. Por outro lado, os resultados obtidos pelo CCM pioram com a diminuição da taxa de amostragem. Técnicas baseadas em correlação cruzada como o CCM necessitam de mais amostras para ter resultados satisfatórios. O EAM, por ter um valor inicial estimado pela fase, consegue obter um melhor desempenho do que o CCM. Para avaliar a taxa de amostragem limite para o EAM e o ACM, foram realizados mais dois experimentos mostrados na Figura a seguir:

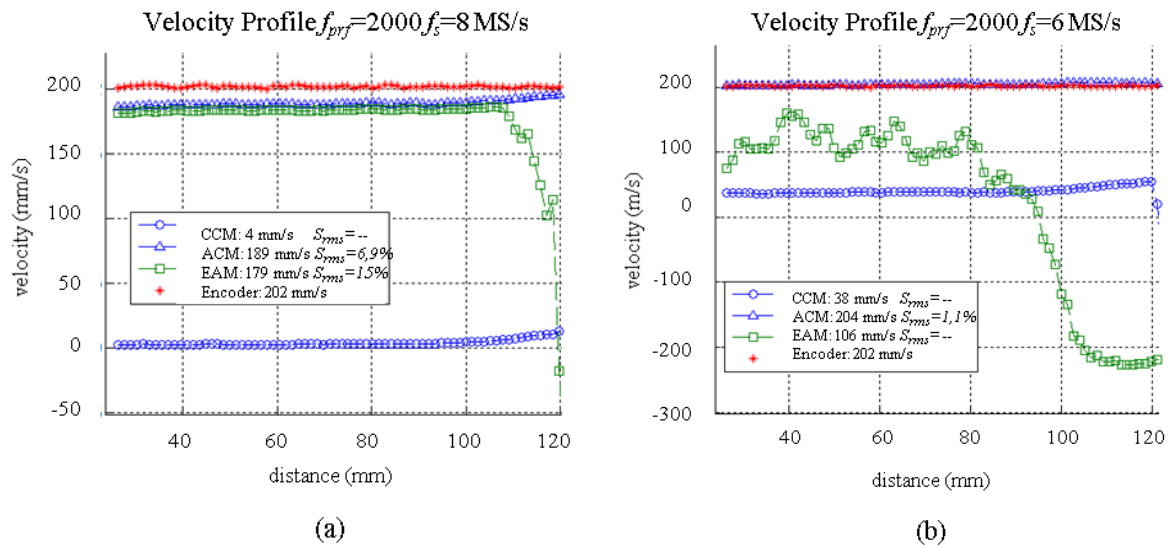


Figura 4.12. – Perfis de velocidade em diferentes taxas de amostragem. (a) 8 MS/s (b) 6 MS/s.

Utilizando o ACM as velocidades foram medidas corretamente mesmo com as baixas taxas de amostragem. No caso do EAM, a partir de 8 MS/s, velocidades erradas são medidas em posições mais distantes. Para a taxa de amostragem de 6 MS/s não é possível medir velocidades válidas. Desta forma, verificou-se que os erros de medição de velocidade por EAM no experimento potencialmente aumentam a partir da taxa de amostragem de 10 MS/s. Conclui-se que com relação a menor taxa de amostragem, o ACM é o melhor estimador, seguido por EAM e por fim o CCM. Essa característica reforça o pior desempenho computacional para o CCM, e o ganho observado com o EAM, que pode ser uma boa alternativa para medição de velocidades maiores sem tanto custo computacional.

5 MEDIÇÃO DA VELOCIDADE EM ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS

Escoamentos multifásicos estão presentes em diversas atividades industriais como na exploração, produção, transporte e separação do petróleo e do gás. Um melhor entendimento do fenômeno pode auxiliar no desenvolvimento de ferramentas para melhoria dos processos existentes. Técnicas para monitorar o perfil de velocidade em escoamentos multifásicos podem ser de grande utilidade em laboratórios de pesquisa, como por exemplo no desenvolvimento de modelos mecânicos para previsão de comportamento desses escoamentos. Além de auxiliar nas pesquisas, a medição de velocidade multifásica também é de grande interesse no desenvolvimento recente dos chamados medidores multifásicos (MMFs). Esses medidores são utilizados na indústria petrolífera para otimizar o processo de teste e produção de campos petrolíferos. Assim, o presente capítulo irá mostrar fundamentos de escoamentos multifásicos e o estado da arte das técnicas de medição multifásica, tanto na área acadêmica como em aplicações voltadas a MMFs. Uma seção somente voltada a revisão bibliográfica da aplicação do ultrassom Doppler em medição multifásica também será apresentada.

5.1 OS ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS

Em mecânica dos fluidos, uma fase se refere a um dos estados da matéria: sólido, líquido ou gasoso. Um escoamento multifásico é um escoamento composto de duas ou mais fases que não se misturam (CROWE, 2006).

Na indústria de petróleo e gás natural os escoamentos multifásicos ocorrem frequentemente devido ao fato do óleo e o gás serem encontrados naturalmente juntos, em reservatórios dentro de rochas porosas como mostrado na Figura 5.1 (BRATLAND, 2013). Os fluidos que surgem destes reservatórios podem ser uma mistura multifásica de óleo, gás natural, água, compostos sólidos inorgânicos como areia e sedimento e compostos orgânicos como asfaltenos, hidratos e parafinas (FALCONE, 2009; SPINELLI, 2006). Desta forma o fenômeno ocorre em todos os processos desde a extração, transporte por dutos até a separação das fases (gás e líquido) para posterior distribuição dos ativos às refinarias.



Figura 5.1. Reservatório de petróleo com gás no topo e óleo em baixo.

Fonte: Adaptado de Bratland (2013)

Quando o escoamento ocorre em dutos fechados, as fases podem se distribuir de diferentes maneiras (padrões) de acordo com uma série de variáveis como: geometria, tamanho e orientação da tubulação, condições operacionais (vazão, pressão, temperatura, etc.) e as propriedades de cada fase (densidade, viscosidade, etc.).

Diversos estudos foram realizados com o objetivo de classificar os escoamentos em padrões. Como a classificação é feita de forma visual existem pequenas diferenças entre os autores mais detalhistas, que utilizam um número maior de padrões, em relação a outros mais simplistas. Shoham (2006) descreve os padrões de escoamento em tubulações horizontal e vertical de acordo com a Figura 5.2 e a Figura 5.3, descritas pelas Tabela 5.1 e 5.2.

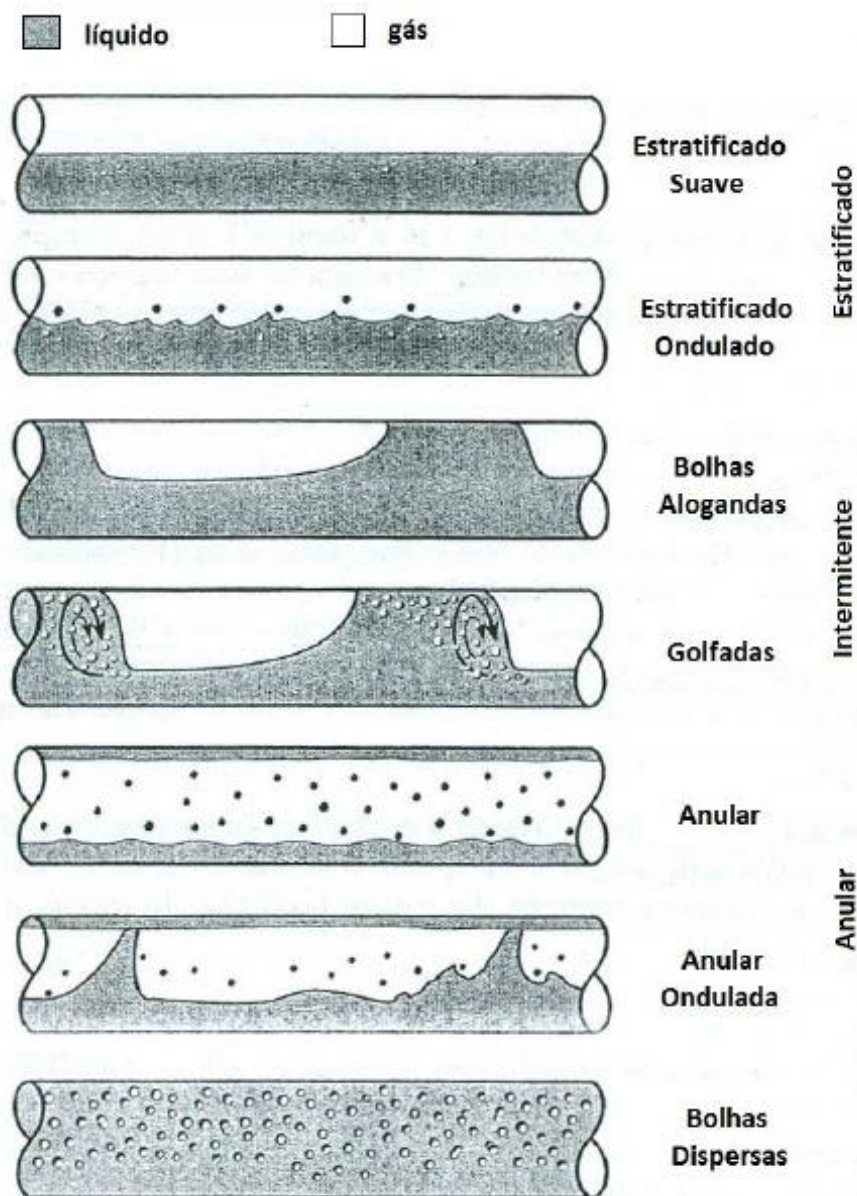


Figura 5.2. Padrão de escoamento para tubulação horizontal. Fonte: Adaptado de Shoham(2006).

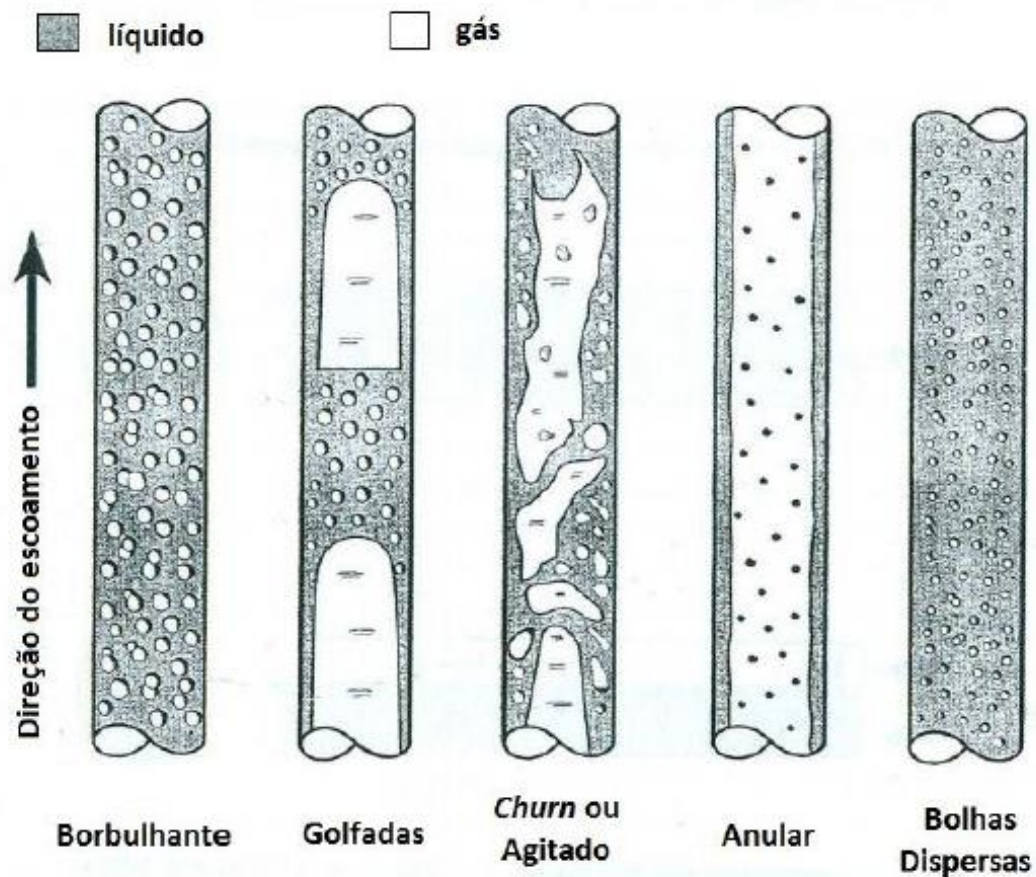


Figura 5.3. Padrão de escoamento para tubulação vertical. Fonte: Adaptado de Shoham (2006).

Tabela 5.1. Resumo comparativo dos padrões definidos na literatura para tubulações horizontais.

Padrão		Descrição
Estratificado	Estratificado liso	Esse padrão ocorre quando a vazão de gás e líquido é baixa. As fases são separadas pela gravidade de forma que o líquido fica em baixo e o gás em cima.
	Estratificado ondulado	Ao aumentar a vazão do gás no padrão estratificado liso ondas periódicas se formam na interface gás-líquido.
Intermitente	Bolhas alongadas	Em vazões de gás menores do que no padrão golfadas o pistão de líquido não apresenta bolhas dispersas.
	Golfadas	Caracterizado pela intermitência entre um pistão de líquido aerado e uma bolha de gás sobre um filme de líquido.
Anular	Anular	Um núcleo de gás em alta velocidade é circundado por um filme de líquido; gotículas de líquido são carregadas em meio à massa gasosa
	Anular ondulado	Ocorre para as vazões de gás mais baixas, na transição entre os padrões estratificado ondulado, golfadas e anular. A maior parte do líquido escoar na porção inferior da tubulação enquanto ondas aeradas varrem a periferia desta, chegando às vezes ao topo.
Bolhas dispersas		Em vazões altas de líquido a fase contínua é líquida e a fase gasosa tem bolhas dispersas.

Tabela 5.2. Identificação e descrição dos padrões de escoamento bifásico líquido-gás em dutos verticais.

Padrão	Descrição
Bolhas	A fase gasosa está em forma de bolhas dispersas que sobem em movimento de zig-zag com o líquido em fase contínua. Ocorre em vazões baixas de líquido.
Golfadas	Pistões de líquido aerado intercalados por bolhas de Taylor que ascendem circundadas por um filme de líquido.
Agitado	Uma forma degenerada do escoamento anular, com grandes ondas na interface gás-líquido.
Anular	Um núcleo de gás em alta velocidade é circundado por um filme de líquido em baixa velocidade; gotículas de líquido são carregadas em meio à massa gasosa
Bolhas	Em vazões altas de líquido a fase contínua é líquida e a fase gasosa tem bolhas dispersas.

A transição entre os diferentes padrões de escoamento é ilustrada por um mapa de fluxo como mostra a Figura 5.4 para escoamento horizontal e a Figura 5.5 para escoamento vertical. Trata-se de uma ferramenta útil para analisar o comportamento do escoamento de acordo com as velocidades superficiais do líquido e do gás.

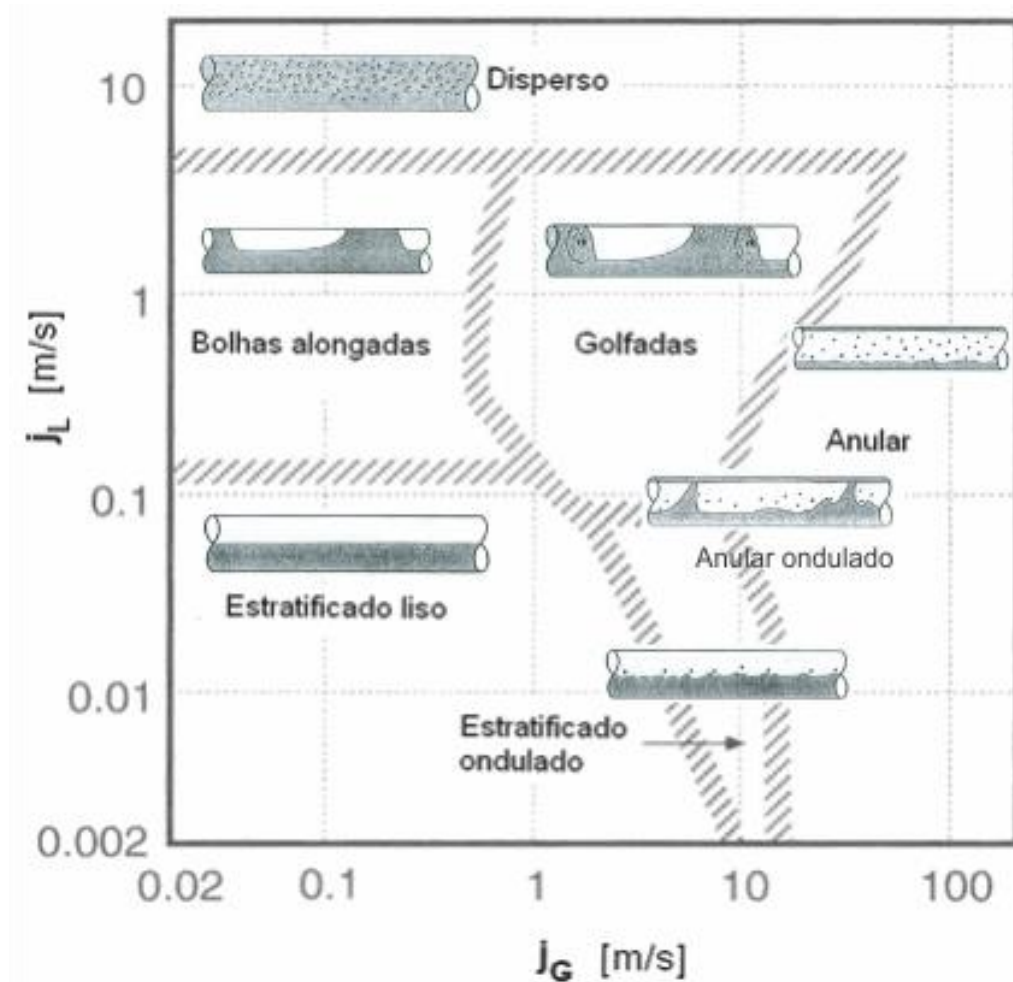


Figura 5.4. Mapa de padrões bifásico líquido-gás em tubulação horizontal.

Fonte: Adaptado de Shohan (2006).

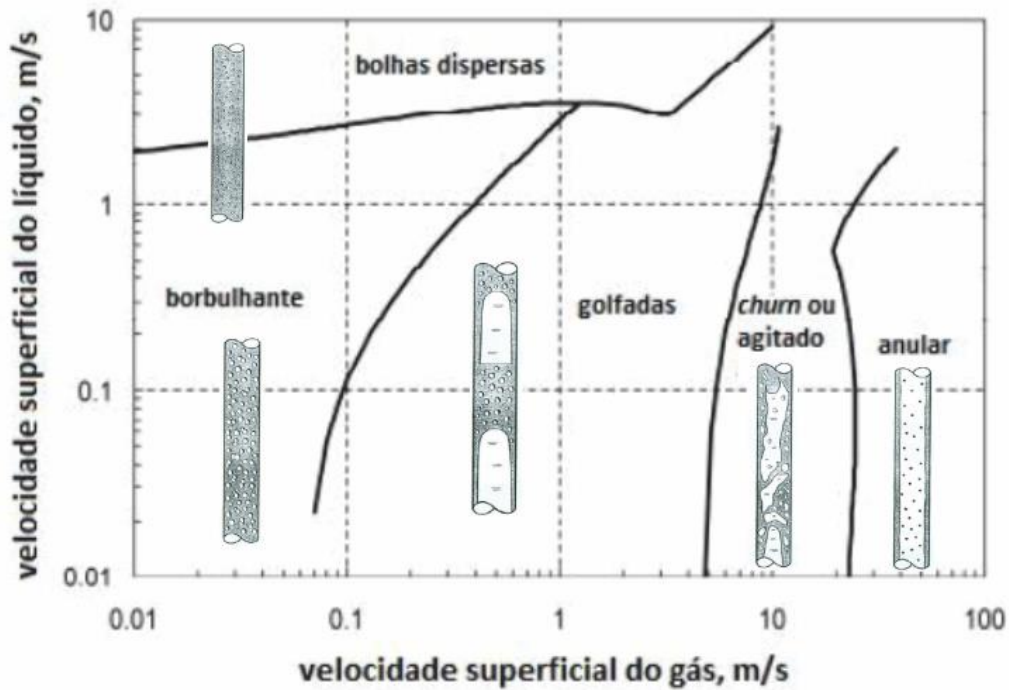


Figura 5.5. Mapa de padrões bifásicos líquido-gás em tubulação vertical.

Fonte: Adaptado de Azzopardi (2006) e Shohan(2006).

Os padrões de escoamento gás líquido discutidos anteriormente também se aplicam a situações em que o líquido é composto por duas fases, como é o caso do escoamento trifásico óleo-água-gás. A complexidade dos padrões aumenta dependendo do grau de mistura entre os líquidos. O óleo e a água normalmente estão bem misturados na forma de emulsão, o que fisicamente seria uma única fase. Em outros casos, como por exemplo um escoamento horizontal, a água e o óleo fluem como fases distintas. Mais discussões sobre os padrões de escoamento trifásicos podem ser encontrados em Keskin e Zhang (2007).

5.2 TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE VELOCIDADE EM MEDIDORES MULTIFÁSICOS

O objetivo de um medidor multifásico é determinar a vazão individual de cada fase, ou seja, determinar a densidade ρ , a velocidade v e as frações volumétricas de gás (FVG), óleo (FVO) e água (FVA) como mostra a Figura 5.6.

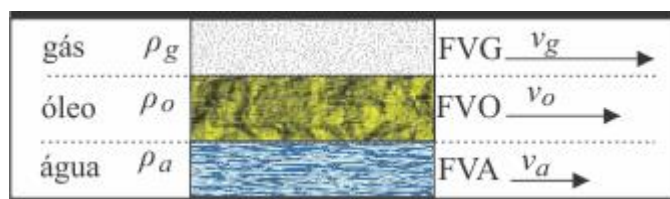


Figura 5.6. MMFs aplicado a distribuição da produção.

A medição dessas variáveis pode ser realizada direta ou indiretamente de acordo com os as técnicas utilizadas. Em geral pode-se dividir os sensores em três categorias, os que medem a fração/característica da fase, velocidade das fases e a quantidade de movimento. Como o foco deste trabalho é a medição de velocidade, serão mostradas apenas técnicas com esse propósito no corpo principal da tese. A medição das frações de fase e a estratégia para combinação dos diferentes parâmetros, e assim realizar a medição multifásica, está detalhada no apêndice D deste trabalho.

5.2.1 Correlação cruzada de sinais

A correlação cruzada é um dos método mais utilizados e antigos pra medição da velocidade das fases dispersas (FISHER, 1964; THORN, 2013). A Figura 5.7 ilustra o cálculo da velocidade por correlação cruzada.

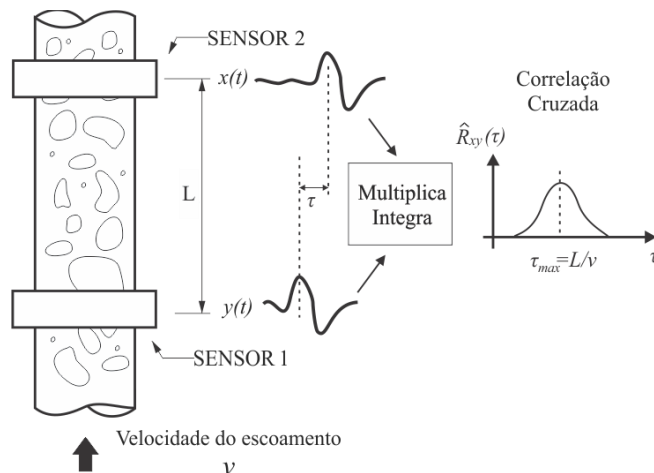


Figura 5.7. Medição da velocidade por correlação cruzada (PIETROFIORENTINI, 2014).

De forma geral, dois sensores espaçados de uma distância L são utilizados para monitorar o escoamento. O padrão de comportamento do fluido é detectado pelos sensores na forma de sinais elétricos. Os sinais são multiplicados e integrados de forma que o valor máximo da correlação cruzada mostra a defasagem temporal τ entre os sensores. A velocidade v é obtida por L e τ .

As características do fluido utilizadas para a correlação cruzada variam para cada tipo de sensor. Sensores capacitivos utilizam a permissividade e a condutância do fluido (ABBON AS, 2011; EMERSON/ROXAR, 2014; PIETROFIORENTINI, 2014). Técnicas por micro-ondas medem as propriedades dielétricas do meio (FMC/MPM, 2014). Sensores por radiação ionizante detectam bolhas de gás e as partículas para fazer a correlação cruzada (NEFTEMETER, 2014).

5.2.2 Rastreamento de vórtices turbulentos por um vetor de sensores

Trata-se de uma técnica mais recente, encontrada nos equipamentos da Exprometer/CiDRA(2014), Weatherford (2014a) e SILIXA(2014). Os vórtices de turbulência podem ser utilizados como padrões de sinais para correlação cruzada. Porém, é utilizada uma metodologia em que vários sensores rastreiam a passagem dos vórtices para gerar um mapeamento espaço-temporal $k-w$. A partir do ângulo de inclinação do gráfico gerado a velocidade do escoamento é obtida (Figura 5.8). Seu uso é limitado a frações de vazio mais baixas ou a escoamentos gás úmido. Mais detalhes podem ser encontrados nos sites das empresas citadas.

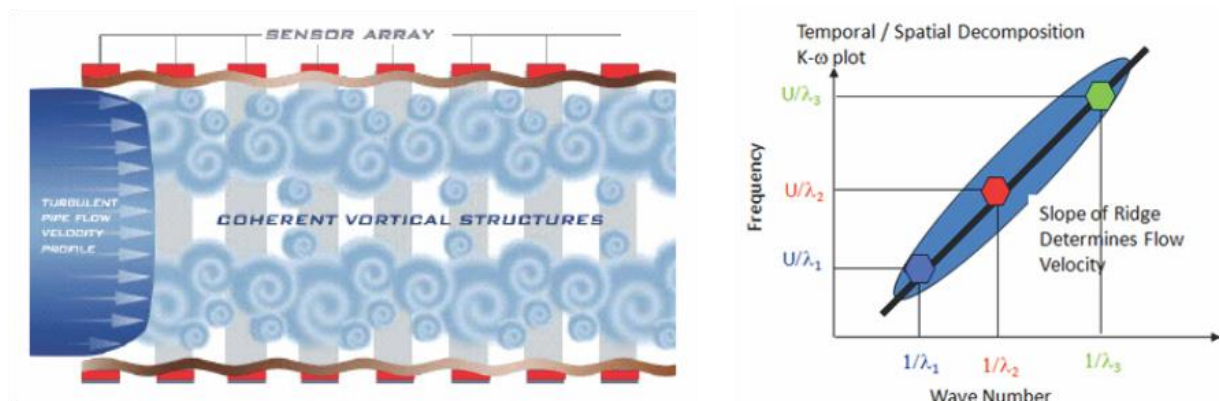


Figura 5.8. Medição da velocidade do escoamento por rastreamento de vórtices.

Fonte: Exprometer/CiDRA(2014)

5.2.3 Efeito Doppler

A técnica por efeito Doppler mede a velocidade das partículas e pequenas bolhas do escoamento e desta forma infere a velocidade das fases. São utilizadas ondas mecânicas como ultrassom (apresentado nas próximas seções deste trabalho) ou micro-ondas (XIE, 2011). Em MMFs comerciais seu uso é restrito a Medeng (2011), mostrado no apêndice D desta tese.

5.2.4 Diferencial da pressão/Venturi

Esse medidor se caracteriza pela medição da quantidade de movimento. A variação da pressão Δp pode ser relacionada com a densidade e velocidade do fluido ao quadrado (ρv^2). Medidores do tipo Venturi e Cone utilizam esse conceito para medidores de vazão monofásicos como mostra a Equação (5.1) e a Figura 5.9 a seguir:

$$v = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right]}} \quad (5.1)$$

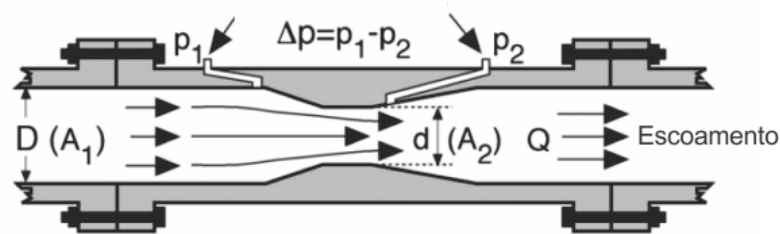


Figura 5.9. Medição da velocidade por variação da pressão.

Esse tipo de medidor é um dos mais utilizados em MMFs comerciais para compor a velocidade das fases (ABBON AS, 2011; EMERSON/ROXAR, 2014; FMC/MPM, 2014; PETROLEUM SOFTWARE, 2014; PIETROFIORENTINI, 2014; SCHLUMBERGER, 2014a; WEATHERFORD, 2014a).

5.2.5 Coriolis

Assim como o Venturi, o Coriolis também é um medidor de quantidade de movimento. A técnica se baseia na correlação entre a vibração de tubos com a vazão mássica (Figura 5.10). O medidor é muito utilizado para em escoamentos monofásicos mas tem sido adaptada para escoamentos multifásicos (AGARCORP, 2013; PETROLEUM SOFTWARE, 2014).

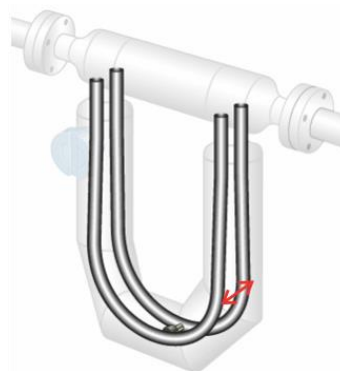


Figura 5.10. Princípio de medição do medidor Coriolis.

Fonte: EmersonProcess (2014)

5.3 TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE VETORES OU CAMPOS DE VELOCIDADE

A medição de vetores ou campos de velocidade é muito utilizada para estudos detalhados do comportamento dos escoamentos na área acadêmica e/ou para pesquisas. Existem técnicas

simples que possibilitam a medição de um vetor velocidade em determinada posição, até técnicas avançadas, que possibilitam a medição tridimensional de campos de velocidade.

5.3.1 Velocimetria por imagem de partículas (PIV)

A velocimetria de imagem por partículas (PIV, do inglês *Particle Image Velocimetry*) é uma técnica óptica para visualização do movimento de partículas em fluidos. O seu princípio básico consiste em iluminar uma seção do escoamento por meio de uma luz pulsada e registrar o movimento das partículas traçadoras previamente distribuídas no fluido com uma câmera (Figura 5.11).

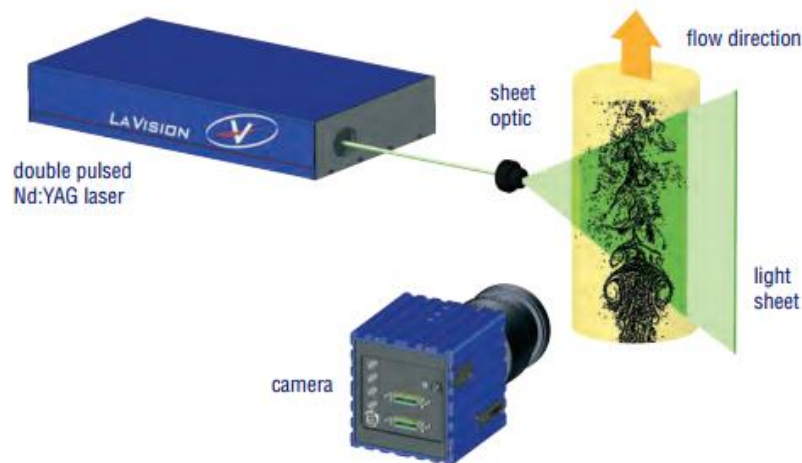


Figura 5.11. Princípio de medição do PIV (LA VISION, 2016).

A imagem gravada é dividida em pequenas janelas de interrogação. Durante o intervalo entre pulsos de laser as partículas sofrem um pequeno deslocamento. Essa distância é calculada através do pico da função de correlação cruzada, obtendo-se assim um vetor velocidade (Figura 5.12). Reunindo todas as janelas de interrogação é formado um campo de velocidades.

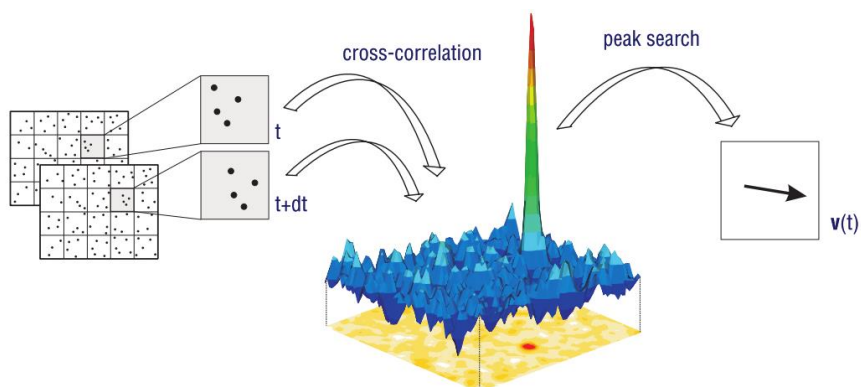


Figura 5.12. Correlação cruzada para calcular o vetor velocidade (LA VISION, 2016).

O PIV é atualmente a técnica mais utilizada para análise de campos de velocidade em estudos experimentais na área de fluidodinâmica. Uma das razões do método ser tão utilizado é a medição simultânea de vetores velocidades em muitos pontos, na ordem de 10^3 - 10^5 (ADRIAN, 2005). Além disso, a técnica foi uma das primeiras a medir vetores de velocidade em três dimensões com o chamado *Stereo*-PIV, que utiliza duas câmeras para compor as imagens (ARROYO; GREATED, 1991). A medição dos vetores de velocidade tridimensionais ao longo do tempo também foi possível utilizando técnicas holográficas (HOLO-PIV), como mostra a revisão de Hisch (2002). Uma outra técnica, que utiliza imagens tomográficas do campo de velocidade, possibilita também a medição tridimensional dos vetores velocidade ao longo do tempo (ELSINGA *et al.*, 2006). Esse método, chamado de TOMO-PIV, possibilita a medição do campo de velocidades em um volume espacial muito maior do que no HOLO-PIV. A técnica também foi adaptada para medição de escoamentos multifásicos, como mostra o trabalho de Hassan (1998). Assim, o PIV é um dos métodos mais completos para medição de campos de velocidade em escoamentos. Porém, como toda técnica óptica, é necessário que as partículas sejam visíveis, o que gera limitações com relação ao fluido e ao aparato experimental que deve ser transparente. Outras desvantagens do método são o alto custo computacional, devido ao processamento das imagens, que limita a medição em tempo real em alguns casos, e o alto custo financeiro do equipamento.

5.3.2 Velocimetria por laser doppler

A velocimetria por laser doppler (LDV, também chamado de anemometria por laser Doppler - LDA) é uma técnica óptica bem estabelecida para medição de velocidade em fluidos. A técnica é conhecida desde o trabalho pioneiro de Yeh e Cummins (1964) e posteriormente popularizada nos anos 70 (DURST, 1976). Um esquemático de funcionamento do LDV é mostrado na Figura 5.13. A medição é realizada em um ponto (volume de medição), no cruzamento entre dois feixes de laser. Essa configuração cria um sistema de franjas de distâncias conhecidas. Conforme partículas passam pelo volume de medição, ocorre o espalhamento da luz para um fotodetector. O desvio de frequência devido a passagem da partícula (efeito Doppler) é calculado, e, utilizando a distância entre franjas, a velocidade é obtida. Existem outras variantes de LDV que podem ser consultadas no artigo de revisão de Czarske (2006).

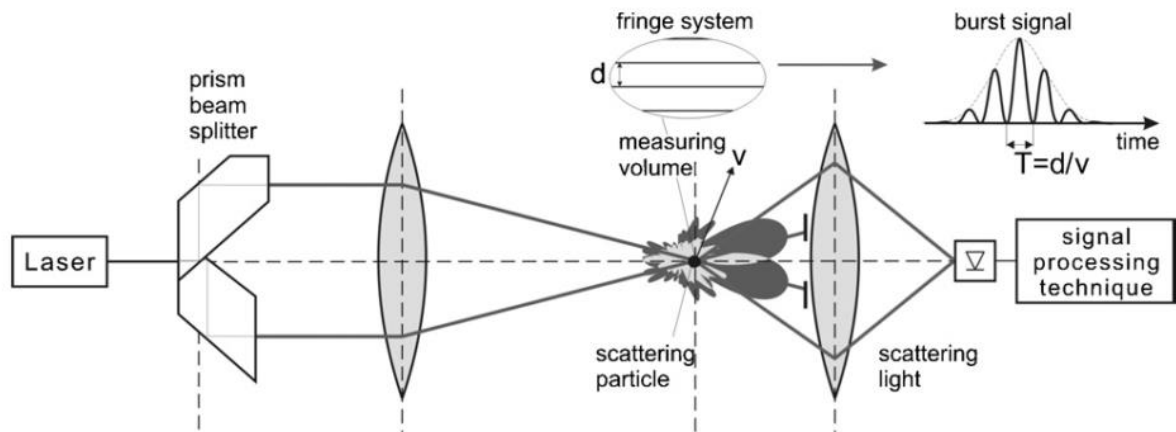


Figura 5.13. Esquemático da técnica LDV. Um feixe de laser é dividido por um prisma. Uma lente foca os feixes coerentes para um único ponto (volume de medição) criando um sistema de franjas com um espaçamento conhecido d . A partícula ao passar pelas franjas gera um sinal com período T (frequência Doppler), possibilitando o cálculo da velocidade v (CZARSKE, 2006).

O LDV é uma das técnicas mais precisas com relação a medição pontual de velocidade. Assim como o PIV, também é possível a medição de um vetor de velocidade bidimensional adicionando mais um laser e um vetor tridimensional utilizando três lasers. Porém quando se trata de medição de campos de velocidade, o PIV é mais vantajoso devido à grande quantidade de vetores usada para visualizar o comportamento do escoamento (WESTERWEEL, 2013). Alguns equipamentos de LDV também possuem a funcionalidade de medir o tamanho de pequenas gotículas (*droplets*) utilizando uma técnica chamada de *Phase Doppler Interferometer* – PDI (ARTIUM TECHNOLOGIES, 2016). A técnica é especialmente útil para caracterização de padrões de sprays e nuvens (CHUANG *et al.*, 2008). Na área de escoamentos bifásicos a técnica é utilizada há muito tempo, desde os anos 70 (DURST; ZARÉ, 1975). Assim como em outras técnicas ópticas, a limitação do LDV é a necessidade de meios transparentes para a medição das partículas.

5.3.3 Anemometria a fio quente

O anemômetro a fio quente (HWA, do inglês *hot-wire anemometry*) é uma das técnicas mais antigas e simples para medição de velocidade (SMOLYAKOV, 1983), inclusive na área de escoamentos multifásicos na qual a técnica tem sido utilizada desde os anos 60 (JONES, 1976). Basicamente, o HWA mede a taxa de transferência de calor do fio para o escoamento no qual é imerso. Essa transferência de calor altera também a tensão de saída do sensor. A medida que a velocidade aumenta a transferência de calor também aumenta, e, com a devida calibração, é possível determinar a velocidade do escoamento. A Figura 5.14 mostra alguns modelos de sondas para anemometria a fio quente. Inicialmente a técnica permitia medir apenas uma

componente de velocidade. Sondas modernas em “X” possibilitaram a medição em até duas componentes de velocidade (BRUUN, 1995a).

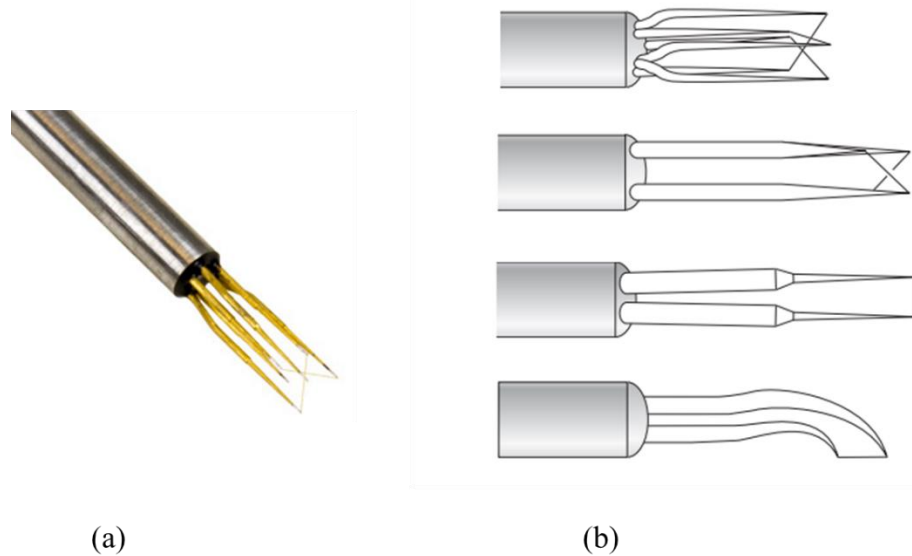


Figura 5.14. Sondas para anemometria de fio quente. (a) Fotografia de uma sonda tipo “X”. (b) Tipos de sondas. Fonte: Catálogo de sondas da TSI (2016).

Existem três modos de operação para o sensor que se distinguem pelo método de controle da corrente elétrica. O anemômetro de temperatura constante (CTA), o mais difundido entre os três, possui um controle na corrente de modo a manter a temperatura do fio constante apesar da transferência de calor que existe. O anemômetro de corrente constante (CCA), menos utilizado, permite que a temperatura do fio se altere. Por último, o anemômetro pulsátil permite quantificar também o sentido da velocidade medida.

A vantagem do uso da anemometria a fio quente é sua simplicidade, baixo custo e imunidade a ruído. Como desvantagem, a técnica é intrusiva e pode medir apenas em um único ponto. Uma revisão mais detalhada do HWA pode ser encontrado em Bruun (1995).

5.3.4 Ultrassom Doppler

O princípio de medição do ultrassom Doppler foi previamente explicado na seção 2.3. Trata-se de uma técnica que possibilita a medição de vetores de velocidade unidimensionais ao longo do campo acústico gerado pelo transdutor. Conforme explicado na seção 2.3.4, a técnica deve considerar que o escoamento se move em determinada direção para que seja feito uma compensação devido ao ângulo de instalação do transdutor. Utilizando dois transdutores de ultrassom é possível medir um campo de velocidades bidimensional como no trabalho de Obayashi *et al.* (2008). Também é possível obter vetores tridimensionais, porém em um volume

espacial menor utilizando múltiplos transdutores, conforme proposto por Hurther e Lemmin (1998, 2001). A utilização do ultrassom Doppler na área de escoamentos multifásicos será mostrada em detalhes na próxima seção.

5.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICAS DAS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS UTILIZANDO ULTRASSOM DOPPLER

Aritomi (1996b), pesquisador da área de engenharia nuclear, foi um dos primeiros a utilizar o UVP em escoamentos bifásicos água-ar. A técnica ultrassônica foi aplicada para medição da velocidade das bolhas dispersas e do líquido em um escoamento água-ar vertical. Para diferenciar a velocidade das fases foi utilizado um escoamento descendente com bolhas dispersas ascendentes. Desta forma as velocidades negativas seriam de líquido e as positivas seriam do gás. A função densidade de probabilidade (PDF) das velocidades mostrada na Figura 5.16 mostra que foi possível diferenciar a velocidade das fases.

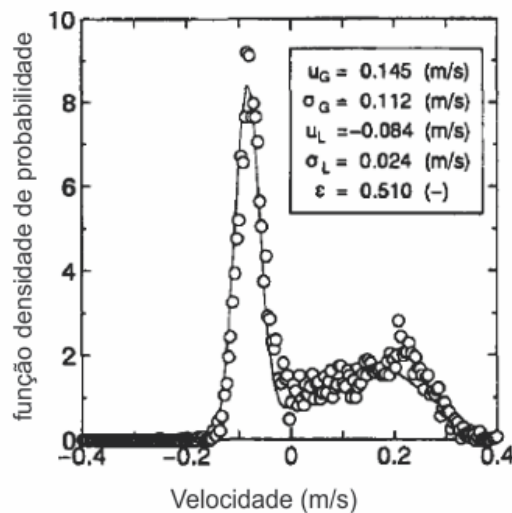


Figura 5.15. Medição da velocidade do gás (U_G) e da velocidade do líquido (U_L)

Fonte: Aritomi (1996b)

Murakawa, Kikura e Aritomi (2005; 2004) observaram que as PDFs das velocidades variam de acordo com o volume de medição do transdutor de ultrassom. Foram realizados testes com escoamento de líquido e gás (bolhas dispersas) fluindo na mesma direção. A Figura 5.16 ilustra esse comportamento para três transdutores de diâmetros distintos:

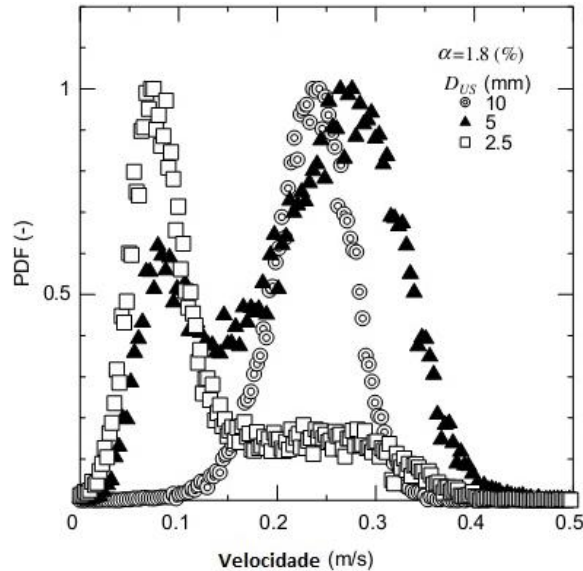


Figura 5.16. PDF das velocidades obtidas utilizando transdutores de diâmetros de 2.5, 5 e 10 mm.

Fonte: Murakawa, Kikura e Aritomi (2005; 2004).

O transdutor de menor diâmetro obteve o valor máximo da PDF para a velocidade do líquido enquanto o transdutor de maior diâmetro obteve o valor máximo da PDF para velocidade das bolhas. O transdutor de diâmetro intermediário obteve uma PDF com dois picos justamente para velocidades do líquido e do gás. A partir desta observação foi proposto o uso de um transdutor de duas frequências e com diferentes diâmetros para disparar pulsos ultrassônicos de volumes de medição distintos (vide seção 2.3.1). A Figura 5.17 ilustra transdutor de diâmetro maior (10 mm) e frequência menor (2MHz), e outro de frequência 8MHz e 3 mm de diâmetro em seu centro.



Figura 5.17. Transdutor de duas frequências proposto por Murakawa, Kikura e Aritomi (2005; 2004).

Minagawa *et al.* (2006) investigaram escoamentos intermitentes verticais no padrão bolha alongada. Foram utilizados dois transdutores angulados em 20 graus e imersos em água para medição do vetor velocidade. A Figura 5.18 ilustra o experimento realizado. Murakawa, Kikura e Aritomi (2008) também investigaram o escoamento intermitente, porém, utilizando o transdutor de duas frequências citado anteriormente. Neste trabalho a técnica de correlação cruzada foi aplicada ao invés do tradicional Doppler pulsado. Houveram dificuldades para medição das velocidades próximas à parede e na traseira da bolha alongada em ambos os experimentos.

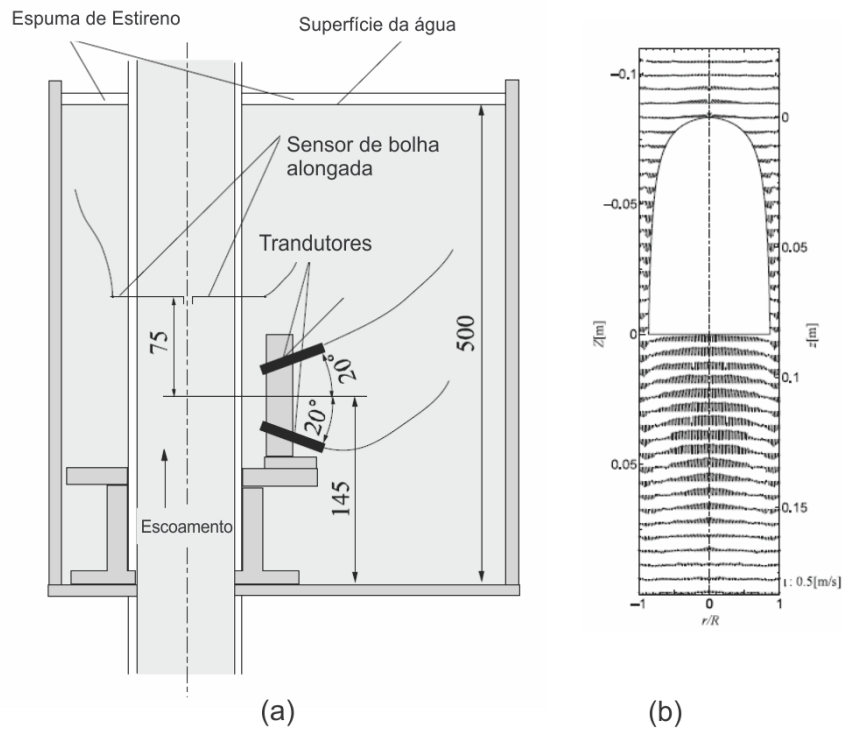


Figura 5.18. (a) Aparato experimental. (b) Perfil de velocidade da bolha alongada.

Fonte: Minagawa *et al.*(2006)

Gonzalez (2008) mediu a velocidade do líquido de um escoamento bifásico água-ar horizontal. As vazões variaram de $0,6\text{m}^3/\text{h}$ a $7,2\text{m}^3/\text{h}$ com frações de vazão de 0 a 50%. O padrão de escoamento foi de bolhas alongadas ou golfadas. Para detectar a interface gás-líquido e mensurar a vazão de líquido corretamente foi utilizado o trabalho de Wada (2006). Três transdutores foram colocados abaixo da tubulação para que fosse possível medir a bolha alongada. A Figura 5.19 ilustra como foi feita a montagem. Foram obtidos erros de 5,1% na vazão de líquido dos experimentos propostos.

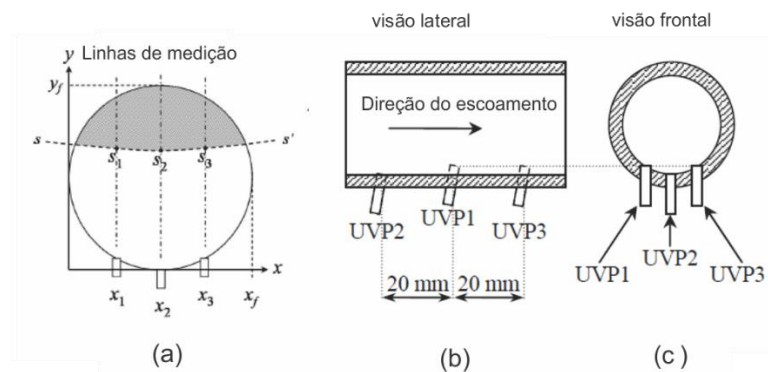


Figura 5.19. (a) Linhas de medição para detectar a bolha alongada (b) visão lateral da montagem (c) visão frontal da montagem.

Fonte: Gonzalez (2008).

Murai, do mesmo grupo que Gonzalez, pesquisou métodos para medição da fração de vazio com o UVP (MURAI *et al.*, 2006, 2009, 2010). Destes estudos um novo medidor de vazão, previamente patenteado (TAKEDA, Y; MURAI; TASAKA, 2010), foi desenvolvido em (MURAI; TASAKA; TAKEDA, 2011). Nesse trabalho diversas configurações de transdutores foram testadas como mostra a Figura 5.20. A disposição radial foi a que obteve melhores resultados. A partir desta constatação foi desenvolvido um aparato mecânico em que foi possível variar o número de transdutores dispostos radialmente (Figura 5.21).

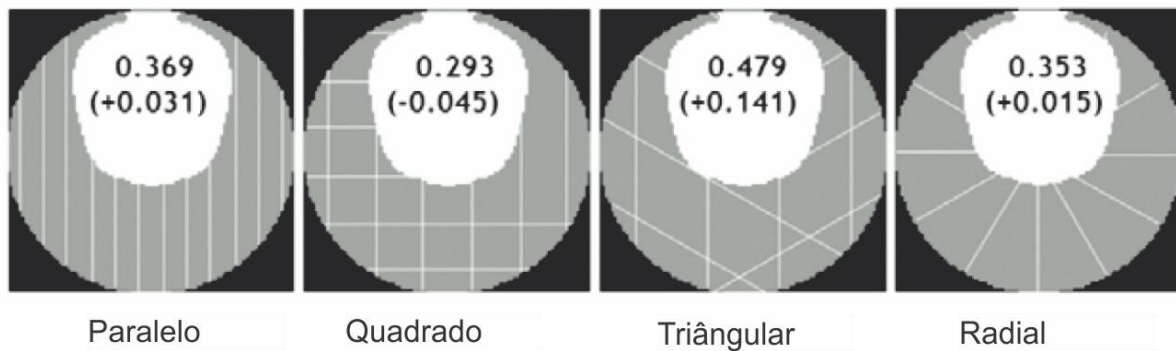


Figura 5.20. Configurações testadas para medição da fração de vazio.

Fonte: Murai, Tasaka e Takeda (2011).

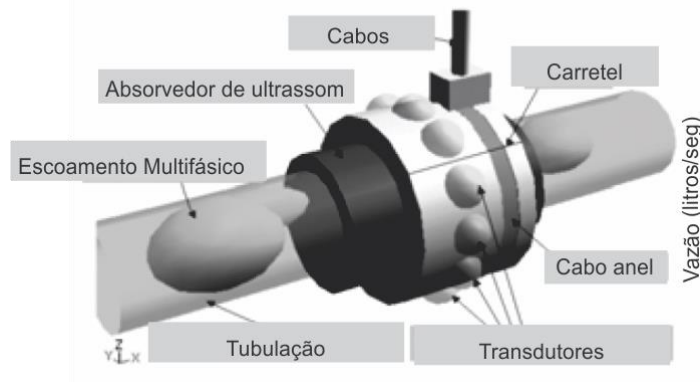


Figura 5.21. Aparato mecânico desenvolvido com suporte a múltiplos transdutores.

Fonte: Murai, Tasaka e Takeda (2011).

A Figura 5.22 mostra os padrões de escoamento em que o sistema funcionou corretamente, e o erro obtido de acordo com o número de transdutores utilizados. Os padrões *slug* (golfadas), *plug* (bolha alongada), anular e alguns casos do padrão bolhas dispersas foram medidos corretamente. Na presença de grande quantidade de bolhas dispersas, a técnica não funcionou corretamente, e seria preciso o uso de parâmetros específicos para corrigir a medição. Também é necessária uma quantidade adequada de transdutores para que o erro seja inferior a 10% como mostrado na Figura.

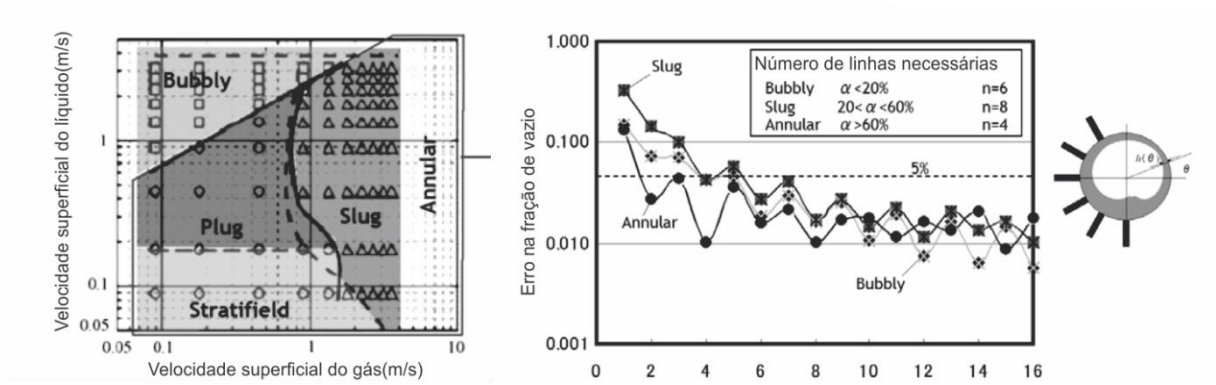


Figura 5.22. (a) Linhas de medição para detectar a bolha alongada (b) visão lateral da montagem (c) visão frontal da montagem.

Fonte: Murai, Tasaka e Takeda (2011).

6 MEDIÇÃO DA VELOCIDADE EM ESCOAMENTOS VERTICAIS UTILIZANDO TÉCNICA ULTRASSÔNICA DOPPLER

Após a validação da técnica EAM em conjunto com um pulsador de END para a medição do campo de velocidade em um cilindro girante, a próxima etapa deste trabalho foi avaliar a técnica em escoamentos dentro de tubulações verticais. Nesse capítulo serão avaliados perfis de velocidade de escoamentos verticais com o óleo como fase contínua, partículas de poliamida/areia como fase sólida e ar como gás.

6.1 BANCADA EXPERIMENTAL

Para simular o escoamento vertical foi utilizado o circuito de testes do Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração na Universidade Federal de Itajubá (LRF-UNIFEI) mostrada na Figura 6.1.

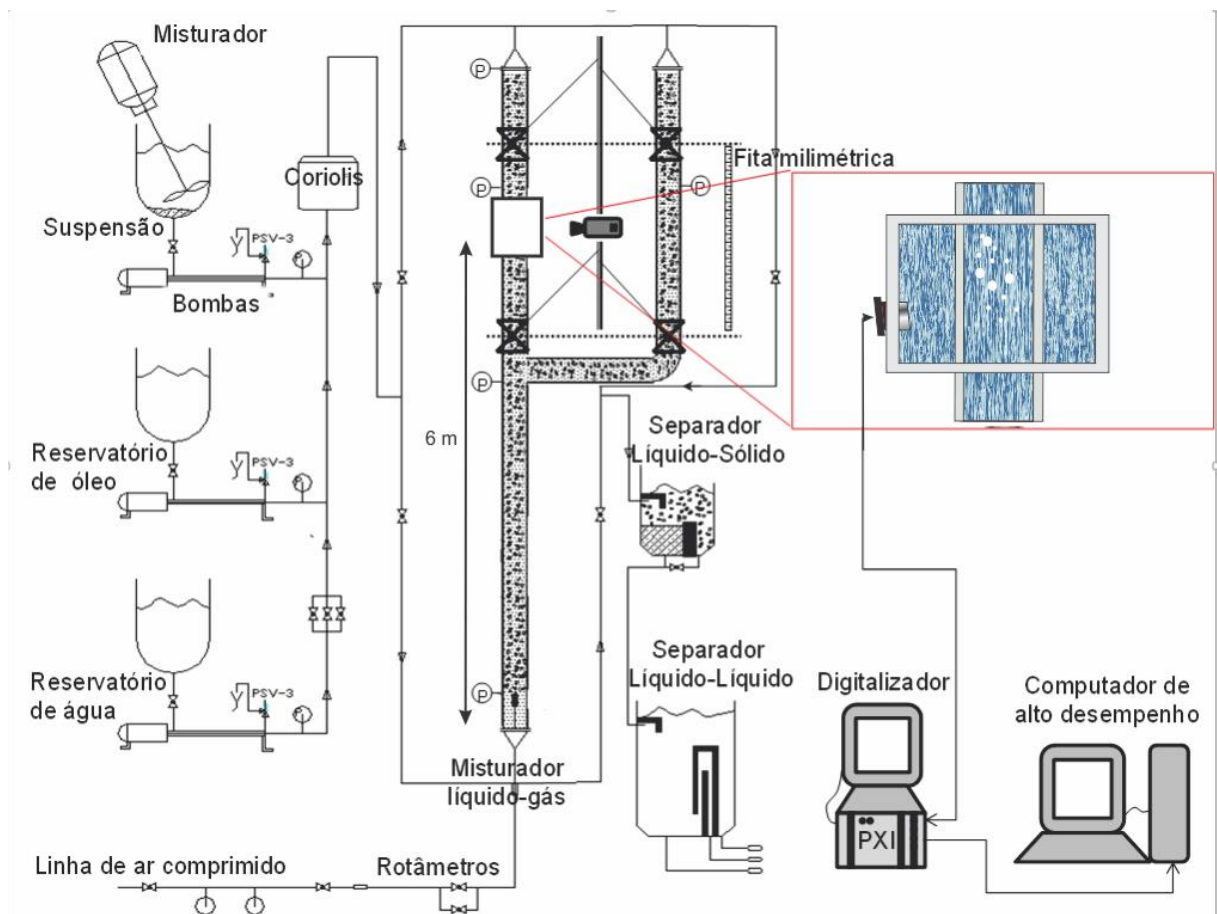


Figura 6.1. Circuito de teste para escoamentos multifásicos (LRF-UNIFEI).

O circuito permite que sejam realizados escoamentos verticais com fase líquida (água e/ou óleo), fase gasosa (ar) e fase sólida (microesferas de vidro e partículas de poliamida). O

líquido e os particulados sólidos são armazenados em tanques e misturados na tubulação. O gás é injetado no início da tubulação de acrílico. O escoamento se desenvolve por 6 metros de altura até o ponto de instrumentação ($L/D \sim 111$), e é posteriormente separado em outros tanques. A seguir segue o detalhamento da planta descrita por Gonçalves (GONÇALVES, 2013).

O óleo é armazenado em um tanque de 500 litros e a água em um tanque de 2000 litros. Os sólidos particulados são armazenados em um terceiro tanque de 2000 litros (Figura 6.2a). Para evitar a deposição das suspensões é utilizado um sistema de recirculação no fundo do tanque e um agitador (hélice acoplada a um motor elétrico de 4 HP como mostra a Figura 6.2b). Duas bombas de cavidade progressiva controladas por inversores de frequência permitiam vazões de até 55 kg/min e 4 % em massa de sólidos (Figura 6.2c). As fases líquidas e sólida são misturadas, e posteriormente a vazão era medida por um medidor do tipo Coriolis, marca Rheonik, modelo RHM12 (0,75 a 100,00 kg/min $\pm 0,2\%$) que inclui um termômetro digital com faixa de operação entre -20 a $120\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 6.3b). A velocidade superficial do líquido J_L também foi baseada nesse medidor.

Uma linha de ar comprimido (~ 6 bar) é utilizada para gerar a fase gasosa. A vazão é medida por um rotâmetro, marca Cole Parmer, (3 a 30 litro/min $\pm 0,1$ litros/min). A velocidade superficial do gás J_G foi calculada a partir deste medidor. O gás é injetado ao escoamento com o auxílio de uma pedra porosa no início da tubulação de acrílico (Figura 6.3a).

O escoamento se desenvolve ao longo da tubulação e a fração volumétrica de gás é medida na seção de válvulas de fechamento rápido na parte superior da tubulação, onde foram posicionados os transdutores ultrassônicos e a câmera de filmagem rápida (Figura 6.4a). O transdutor fica imerso em óleo, dentro caixa de visualização, posicionado a uma diferença de 5 graus da tubulação (Figura 6.4b). As válvulas no circuito principal aprisionam o escoamento ao serem acionadas enquanto uma outra válvula libera o fluxo para uma tubulação de desvio. O comprimento do trecho entre as duas válvulas da tubulação principal é de 138 cm na tubulação de duas polegadas e de 102 cm na tubulação de uma polegada. Após aproximadamente 25 segundos do fechamento das válvulas, o gás aprisionado se separa da fase líquida por efeito gravitacional e as alturas da coluna de líquido e de gás são medidas por uma escala milimétrica, sendo então possível calcular a FVG.

A fim de se monitorar a operação da montagem, as pressões nos vários pontos foram medidas por manômetros do tipo Bourdon (0 a 0,27 bar $\pm 0,014$ bar), posicionados da seguinte forma: um no ponto de injeção, outro a 3 metros acima e outro a 5 metros acima do ponto de injeção (Figura 6.1). A temperatura do ar no ponto de injeção foi suposta igual à temperatura do ar atmosférico, medida por um termômetro de bulbo com precisão de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Embora se

soubesse que a temperatura do ar no ponto de injeção fosse ligeiramente maior do que a temperatura ambiente, essa hipótese foi necessária devido às dificuldades de instrumentação. Entretanto, a temperatura do ar no ponto de medição (~ 6m de altura) foi considerada igual à temperatura do líquido por causa da alta taxa de transferência de calor entre bolhas e líquido.

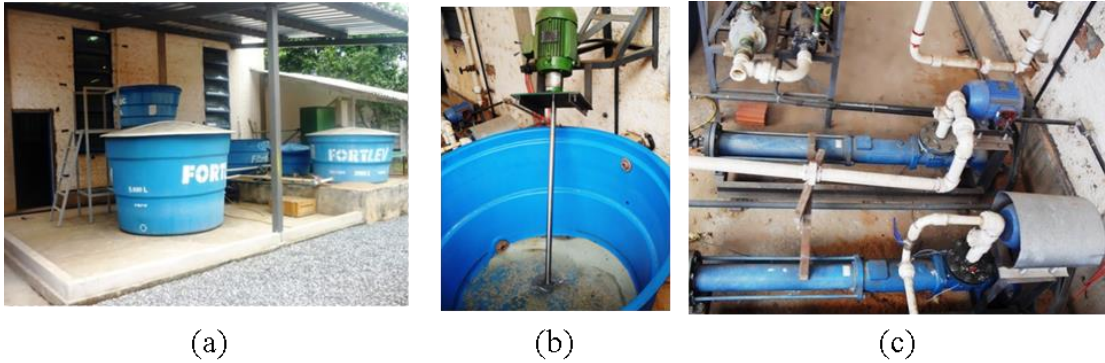


Figura 6.2. (a) Reservatórios do circuito experimental, (b) tanque de suspensão e (c) bombas de cavidade progressiva.



Figura 6.3. (a) Ponto de injeção de gás no escoamento e (b) Sistema de controle e medição das vazões de líquido.

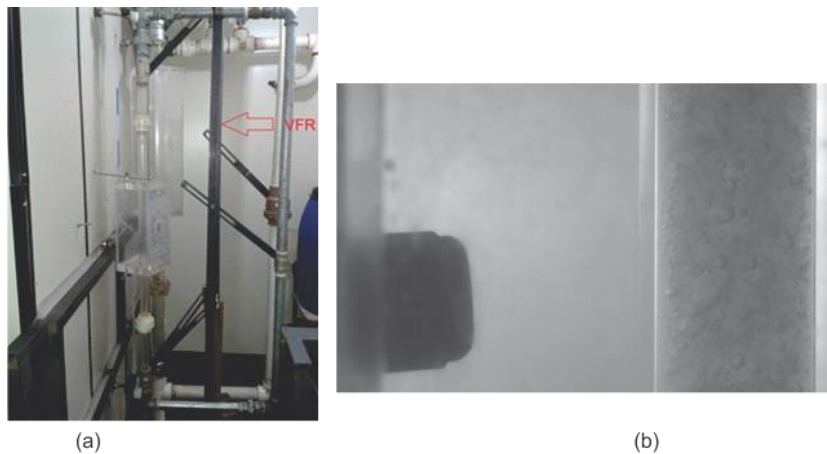


Figura 6.4. (a) Seção de testes entre as válvulas de fechamento rápido e (b) montagem do transdutor na seção de testes angulado a 5 graus.

O escoamento segue então para o primeiro separador, onde o gás e os sólidos são separados da fase líquida e, em seguida, o óleo é separado da água no segundo separador. Em todos os casos, a separação é feita pela ação da gravidade.

6.2 INSTRUMENTAÇÃO

6.2.1 Instrumentação Ultrassônica

A onda ultrassônica foi gerada e recebida por um pulsador-receptor da Olympus modelo 5077PR (Figura 6.6). Foi utilizada uma tensão de 100V a uma taxa de repetição de 2000 pulsos por segundo a um ganho de 20 dB. O sinal foi adquirido por um digitalizador modelo PXI-5105 da National Instruments (Figura 6.5) a uma taxa de 60 MS/s. O transdutor de ultrassom utilizado foi da marca Met-flow modelo TX4-2.5-4, com frequência central de 4 MHz, diâmetro ativo de 5 mm (Figura 6.7). O sensor foi imerso em uma caixa de água externa a tubulação, disposto de um ângulo de inclinação de aproximadamente 5 graus como mostra a Figura 6.4.



Figura 6.5. Sistema de aquisição da National Instruments.



Figura 6.6. Pulsador e receptor de ondas ultrassônicas Olympus modelo 5077PR.



Figura 6.7. Transdutor de ultrassom Met-flow de 4 MHz.

6.2.2 Câmera de alta velocidade

Para avaliar o escoamento trifásicos gás-líquido-sólido, foi utilizada uma câmera de alta velocidade. O equipamento teve duas funções no projeto: reconhecimento do padrão de escoamento e para a medição da velocidade das bolhas dispersas presentes na mistura. O modelo utilizado no experimento foi a câmera MotionPro X4, de marca RedLake (Figura 6.8), capaz de proporcionar uma taxa de aquisição de até 1000 imagens por segundo. Para melhorar a qualidade das imagens adquiridas, foi instalada uma lâmpada de 100W/60Hz para melhorar a iluminação da seção de testes. Também foi utilizado um difusor para distribuir a luz de maneira homogênea sobre o objeto a ser filmado.

Os padrões de escoamento podem ser visualizados nas próximas seções deste documento. A Figura 6.9 ilustra o processo para medir a velocidade das partículas do escoamento. O deslocamento pode ser calculado pela posição absoluta (x,y) em cada imagem, sendo que foram utilizadas as coordenadas no eixo y para medir a velocidade vertical das bolhas. O tempo utilizado entre cada imagem depende da velocidade de aquisição da câmera. Um *software* foi desenvolvido para auxiliar nesse processo (Apêndice D).



Figura 6.8. Câmera de alta velocidade RedLake MotionPro X4.

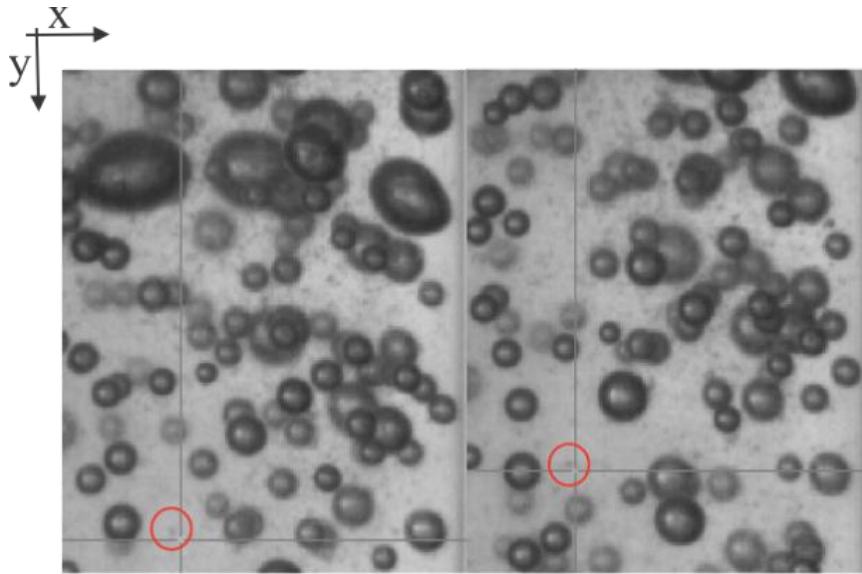


Figura 6.9. Monitoramento da trajetória de partículas no escoamento.

O tamanho dos pixels é convertido em distância pelo diâmetro interno da tubulação como mostra a Figura 6.10.

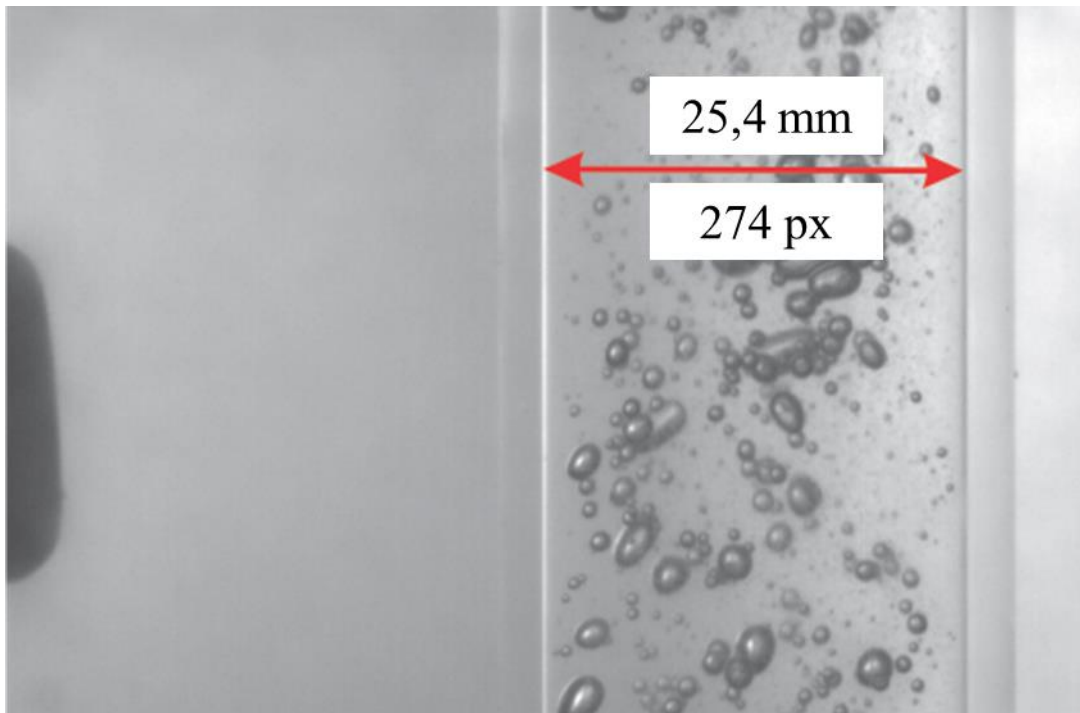


Figura 6.10. Conversão de pixels em milímetros.

A velocidade é calculada pela seguinte fórmula:

$$V = \frac{d_m \Delta pix}{d_p \Delta t} \quad (6.1)$$

onde d_m é o diâmetro interno do tubo de 1 polegada em milímetros, d_p é o diâmetro interno do tubo em pixels, Δpix é a distância percorrida pela partícula no sentido vertical (y) e um intervalo de tempo Δt de frames da câmera.

6.3 INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

Para avaliar as incertezas de medição dos resultados experimentais foi utilizado o guia de incertezas de medição (GUM). A metodologia GUM é um método de análise de incertezas mundialmente reconhecido pelos padrões internacionais (ISO). Foram levantadas as componentes de incerteza e suas respectivas incertezas padrão. Em seguida foram avaliadas as contribuições de cada variável na incerteza total por meio de derivadas parciais. As incertezas foram combinadas e depois expandidas para uma distribuição de probabilidade de 95,45%. As tabelas estão detalhadas no Apêndice E.

6.3.1 Incerteza de medição da câmera de alta velocidade

A equação (6.1) mostra que a velocidade do escoamento é função do deslocamento da partícula, do diâmetro da tubulação em milímetros e pixels e do tempo. A incerteza combinada da velocidade $uc(v)$ é dada por:

$$\frac{uc(v)}{V} = \sqrt{\left(\frac{u(d_m)}{d_m}\right)^2 + \left(\frac{u(d_p)}{d_p}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta pix)}{\Delta pix}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta t)}{\Delta t}\right)^2} \quad (6.2)$$

onde as incertezas de cada variável são representadas pela função $u(x)$.

A incerteza de medição para o diâmetro da tubulação foi considerada como a metade da resolução do equipamento utilizado para medição. Na medição em milímetros e em pixels a incerteza foi considerada como 1/2.

A incerteza de tempo também está relacionada ao valor máximo de frames por segundo configurável na câmera. Portanto a incerteza de tempo foi considerada como (1/2000) segundos.

6.3.2 Incertezas de medição do estimador ultrassônico de velocidade

A equação (6.1) mostra que a velocidade do escoamento é função da velocidade do som no meio, da frequência central do transdutor, da frequência de repetição de pulsos, do ângulo de inclinação e da fase medida pela autocorrelação estendida. A incerteza combinada da velocidade $uc(v)$ é dada por:

$$\frac{uc(v)}{v} = \sqrt{\left(\frac{u(c)}{c}\right)^2 + \left(\frac{u(f_0)}{f_0}\right)^2 + \left(\frac{u(f_{PRF})}{f_{PRF}}\right)^2 + \left(\frac{u(\varphi)}{\varphi}\right)^2 + \left(\left|-\frac{1}{\tan\theta}\right|u(\theta)\right)^2} \quad (6.3)$$

onde as incertezas de cada variável são representadas pela função $u(x)$.

A incerteza de medição para a velocidade do som no meio foi considerada como 10 m/s. A frequência central do transdutor medida no osciloscópio apresentou 10 kHz de diferença com a frequência central especificada (4 MHz). Essa diferença foi adicionada como incerteza da variável. A incerteza temporal da taxa de repetição de pulsos pode ser considerada pelo máximo valor configurável no equipamento de 5000 pulsos por segundo, o que resulta em uma incerteza de (1/1000) segundos. O ângulo de medição é a variável com maior influência na incerteza do sistema. Com a imagem capturada pela câmera foi avaliado uma incerteza de 0,5 graus. A incerteza da fase medida pela técnica de autocorrelação foi obtida através do desvio padrão dos resultados obtidos.

6.4 METODOLOGIA

Primeiramente foram realizadas medidas de um escoamento com óleo como fase contínua e partículas de poliamida de 80 μm a 200 μm , a uma proporção de 1 grama por litro como refletores. Em seguida foram adicionadas microesferas de vidro com distribuição de tamanho de partículas de 80 μm a 600 μm para simular areia no sistema. Os diâmetros das partículas estudadas neste trabalho não estão em uma faixa crítica de atenuação de sinal conforme mostra o gráfico de espectro da atenuação da (Figura 6.11). Pelo gráfico, os valores de atenuação para uma frequência de transdutor de 4 MHz não estão em um pico de atenuação o que em teoria garante uma relação sinal ruído adequada para as medições (DUKHIN; GOETZ, 2002).

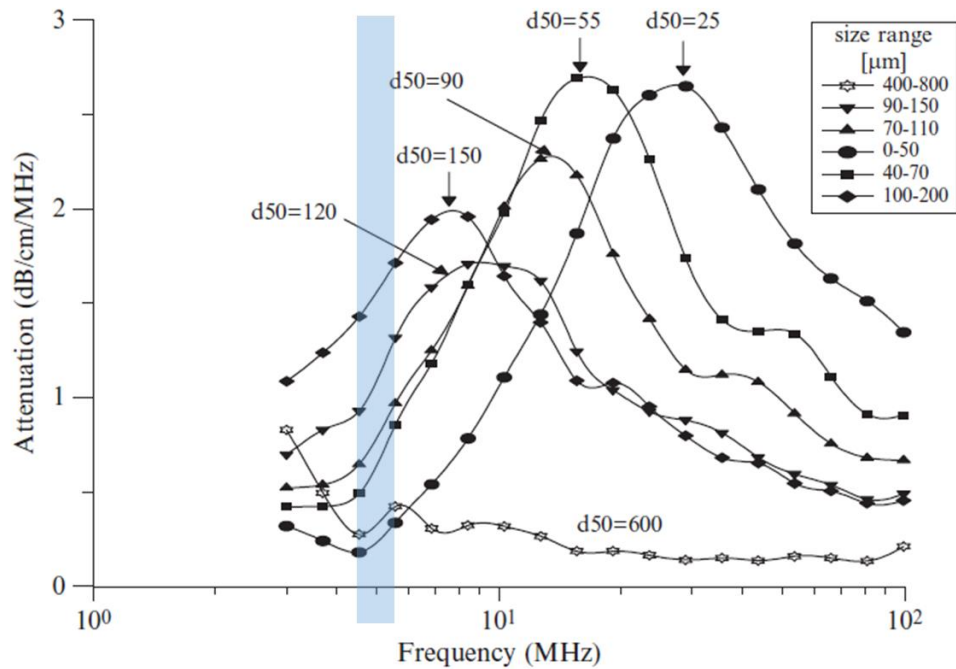


Figura 6.11. Espectro de atenuação para esferas de vidro de diversos tamanhos. Fonte: (DUKHIN; GOETZ, 2002).

Foi utilizado um óleo USP ($\rho=814,5 \text{ kg/m}^3$ e $\mu=41,36 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$) em velocidades de até $0,261 \text{ m/s}$. Nessas condições em que o escoamento opera em regime laminar ($Re < 2100$), o perfil de velocidade teórico u pode ser obtido pela seguinte equação:

$$u(r) = 2V_m \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right), \quad (6.4)$$

onde V_m é a velocidade média do escoamento (obtida pelo medidor Coriolis), r é a posição espacial que varia do centro do tubo até a extremidade e R é o raio da tubulação. Desta forma, é possível comparar os valores experimentais e teóricos de perfil de velocidade. Para comparar as velocidades médias, o perfil de velocidade deve ser integrado na seção transversal do tubo conforme a equação

$$U(t) = \frac{\int_0^R u(r, t) r dr}{R^2}, \quad (6.5)$$

onde $U(t)$ é a velocidade média em um determinado tempo t , medindo no intervalo 0 a R . Como o perfil de velocidade medido por ultrassom não é ideal, e, portanto, não é simétrico, a equação é utilizada duas vezes para integrar a velocidade de toda a seção transversal, de parede a parede. O perfil e a velocidade média por ultrassom são comparados ao perfil calculado e a velocidade média obtida pelo Coriolis.

Para avaliar o escoamento líquido-sólido-gás, serão necessárias outras análises além da medição e integração do perfil de velocidade. O estudo da PDF das velocidade medidas tem sido utilizado para obter a velocidade do gás e do líquido separadamente (regime turbulento) conforme trabalhos anteriores de Aritomi *et al.* (1996b) e Murakawa *et al.* (2005). A mesma ideia será aplicada nesse trabalho, porém como o líquido utilizado é o óleo, o regime analisado é laminar, o que nunca antes foi estudado na literatura. Os autores citados também utilizam transdutores de diâmetros e frequências diferentes, o que não foi possível neste trabalho em que somente o transdutor de 4 MHz foi utilizado. Por fim, outra variável estudada será a velocidade no filme de líquido próximo a parede do tubo. Em muitos padrões de escoamento com alta fração de vazio, somente o filme de líquido é mensurável por ultrassom.

6.5 RESULTADOS PARA O ESCOAMENTO LÍQUIDO-SÓLIDO

6.5.1 Escoamento óleo-poliamida

A velocidade média do escoamento para esse experimento foi de 0,26 m/s de acordo com o medidor Coriolis. O perfil de velocidade obtido por ultrassom é comparado ao perfil teórico de um escoamento laminar, calculado a partir da velocidade média do medidor Coriolis (Figura 6.12). Os resultados indicam que as medições são muito similares entre si.

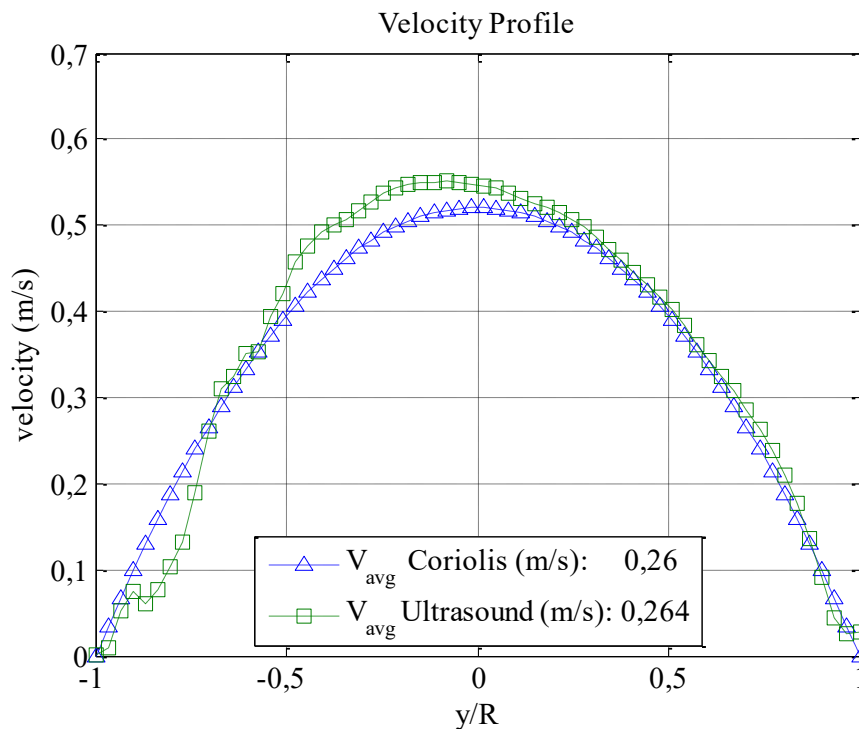


Figura 6.12. Comparação entre o perfil de velocidade obtido pela técnica ultrassônica e pelo medidor Coriolis, utilizando o perfil teórico/analítico do escoamento laminar.

Além do perfil de velocidade ao longo da seção transversal, as medidas de velocidade instantâneas possibilitam avaliar o comportamento do escoamento ao longo do tempo e do espaço. A Figura 6.13 mostra a velocidade média e o perfil de velocidade. No experimento, é possível verificar que a velocidade varia ao longo do tempo. Essa intermitência pode ser causada pelo comportamento da bomba centrífuga. Essa constatação também foi verificada em outros experimentos que serão apresentados posteriormente neste trabalho. Outra informação de interesse é a distribuição das velocidades. A Figura 6.14 mostra um gráfico da função densidade de probabilidade (PDF) das velocidades medidas por ultrassom comparadas a um perfil de velocidade teórico de um escoamento laminar. A comparação mostra como a intermitência da bomba centrífuga gera um perfil mais distribuído nas diferentes faixas de velocidade. Apesar disso, o valor máximo das PDFs está na mesma faixa de velocidade, o que mostra que o comportamento da técnica ultrassônica segue a tendência do perfil ideal.

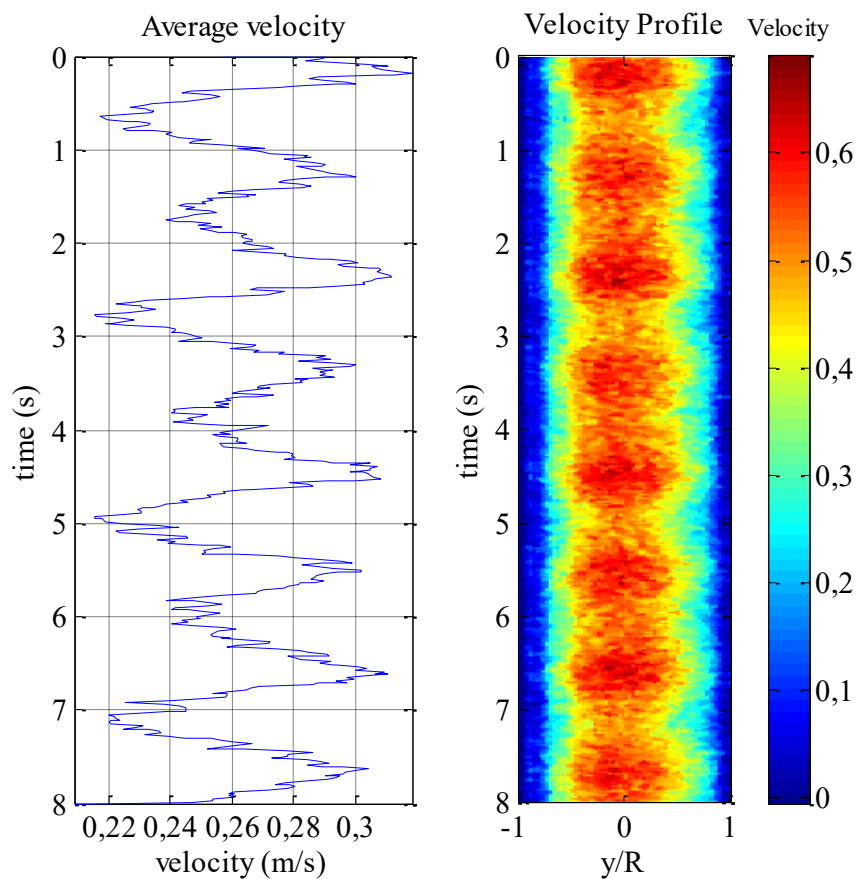


Figura 6.13. Velocidade média da série temporal e o perfil de velocidade espaço temporal do escoamento óleo e partículas.

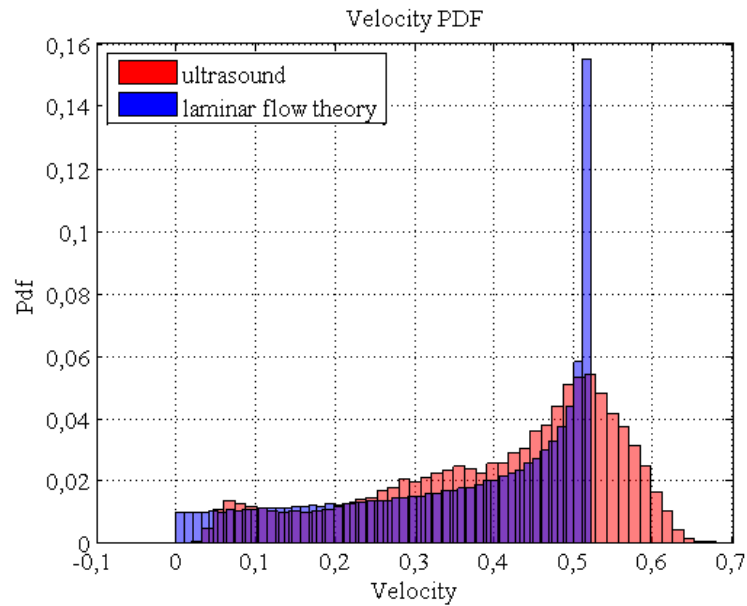


Figura 6.14. PDF das velocidades medidas por ultrassom e de um perfil de velocidades laminar teórico.

6.5.2 Escoamento óleo-poliamida-areia

A areia é um particulado sólido que pode ser encontrado na indústria de óleo e gás, principalmente em poços submarinos. Assim, o uso da areia como um refletor acústico seria um cenário mais próximo da realidade para a aplicação do ultrassom para medição de escoamentos na indústria de óleo e gás. Desta forma, foi realizado um experimento em que se variou a percentagem de areia no escoamento em concentrações 0,16% a 1,12%, com passos incrementais de 0,16%. Esses valores são coerentes com as concentrações encontradas na indústria de petróleo e gás (YAN, 2010). Devido às limitações no aparato experimental, essa concentração de areia foi adicionada à mistura de óleo e partículas (concentração de 1 grama por litro) do experimento anteriormente explicado. Essa condição pouco interfere na medida da velocidade, desde que a relação sinal ruído não seja deteriorada. Conforme comentado anteriormente, equipamentos comerciais de medição de velocidade por ultrassom relatam medições em ambientes com até 10% de concentração de particulados, o que está bem acima do experimento proposto. A Figura 6.15 mostra o perfil de velocidade e a velocidade média do escoamento para uma concentração de 0,83% de areia em um intervalo de 8 segundos.

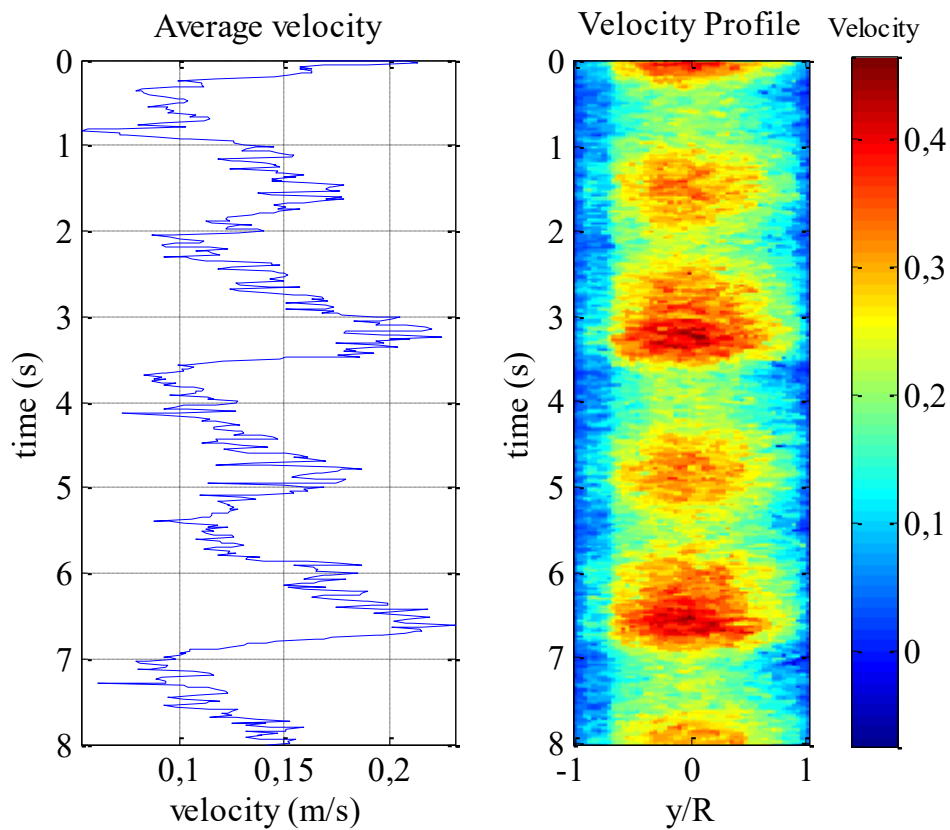


Figura 6.15. Série temporal de velocidade média e o perfil de velocidade espaço temporal do escoamento óleo, areia e partículas.

Da mesma forma que no experimento anterior, é possível verificar uma intermitência na velocidade do líquido. A velocidade média do escoamento medida pelo Coriolis foi de 0,138 m/s, baseado nessa velocidade média foi gerado um perfil de velocidade para um escoamento laminar. Esse perfil foi comparado ao perfil de velocidade obtido por ultrassom como mostra a Figura 6.16. Os perfis de velocidade e a integração deles resultaram em valores muito próximos entre as duas técnicas. Pequenas variações no perfil laminar medido por ultrassom podem ter sido ocasionadas pelo desalinhamento da tubulação na seção vertical.

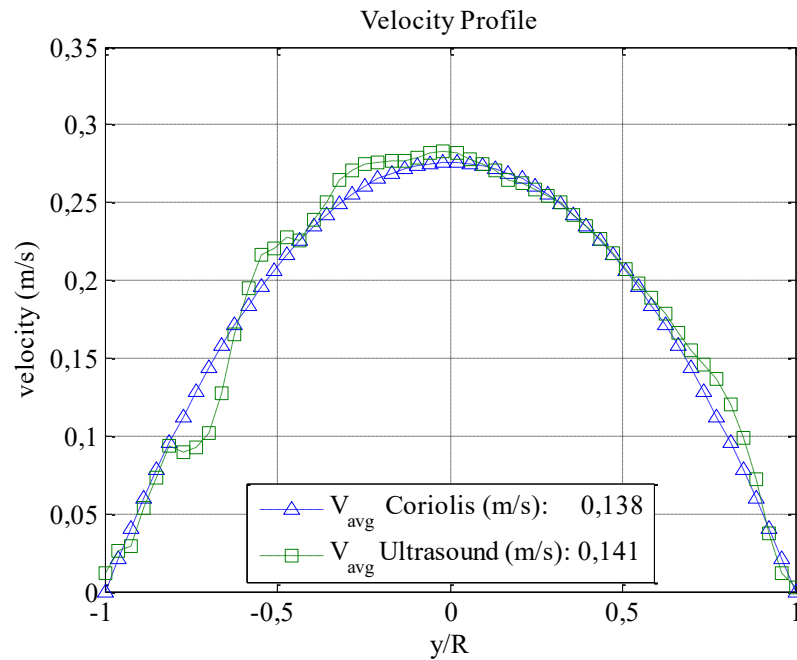


Figura 6.16. Comparação entre gráficos de perfil de velocidade obtidos por ultrassom e pelo medidor Coriolis (perfil teórico/analítico) para 0,83% de areia.

Uma análise de incerteza mais detalhada foi realizada nesses testes. A Figura 6.17 e a Tabela 6.1 mostram um comparativo entre as velocidades medidas pelo Coriolis e por técnica ultrassônica (integração de perfil) com suas respectivas incertezas. As velocidades medidas são satisfatórias, sendo coerentes entre si para as faixas de incerteza determinadas.

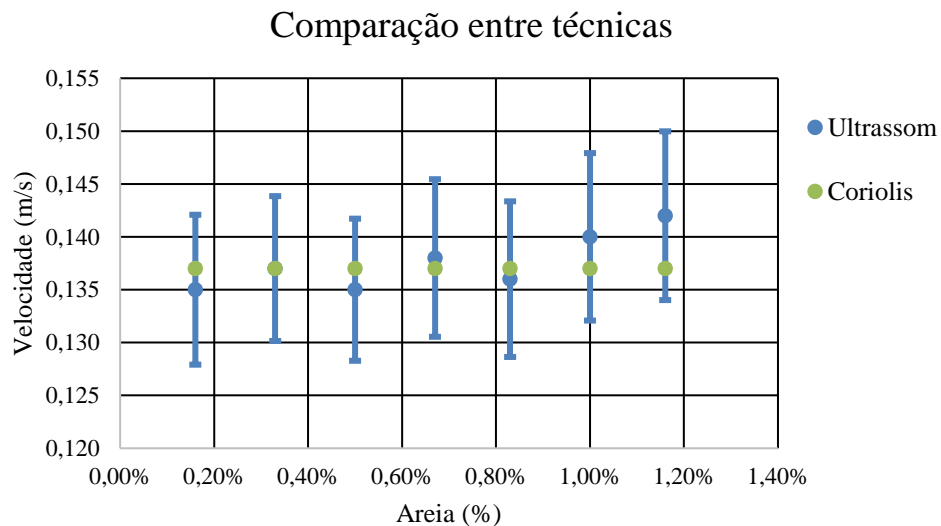


Figura 6.17. Comparação entre as velocidades medidas pelas técnicas de ultrassom e Coriolis e suas respectivas incertezas.

Tabela 6.1. Comparação entre as velocidades medidas pelas técnicas de ultrassom e Coriolis e suas respectivas incertezas.

Comparação entre velocidades (m/s)		
%Areia	Ultrassom	Coriolis
0,16%	0,138±5,8%	0,137±0,2%
0,32%	0,137±5,0%	
0,48%	0,135±5,5%	
0,64%	0,138±5,4%	
0,80%	0,136±5,4%	
0,96%	0,140±5,7%	
1,12%	0,142±5,5%	

Os resultados mostrados nessa seção validam o uso do pulsador END para medições de velocidade em escoamentos líquido-sólido. Essa premissa embasa o uso da técnica proposta para análise de outros padrões de escoamentos que serão mostrados a seguir.

6.6 RESULTADOS PARA O ESCOAMENTO LÍQUIDO-SÓLIDO-GÁS

Escoamentos gás-líquido em tubulações podem ocorrer em diferentes geometrias e configurações conforme mostrado anteriormente. Neste trabalho foram simulados diversos padrões de escoamento em uma tubulação vertical, alterando-se os parâmetros de velocidade superficial do líquido, velocidade superficial do gás e a fração de vazio em cada experimento. Uma câmera de alta velocidade foi utilizada para avaliar as condições experimentais e também obter a velocidade das bolhas no escoamento. Nessas condições foi avaliado o uso da técnica ultrassônica para cada caso. A Tabela 6.2 mostra as condições experimentais para a geração dos diferentes padrões de escoamento que foram classificados de acordo com as imagens mostradas na Figura 6.18.

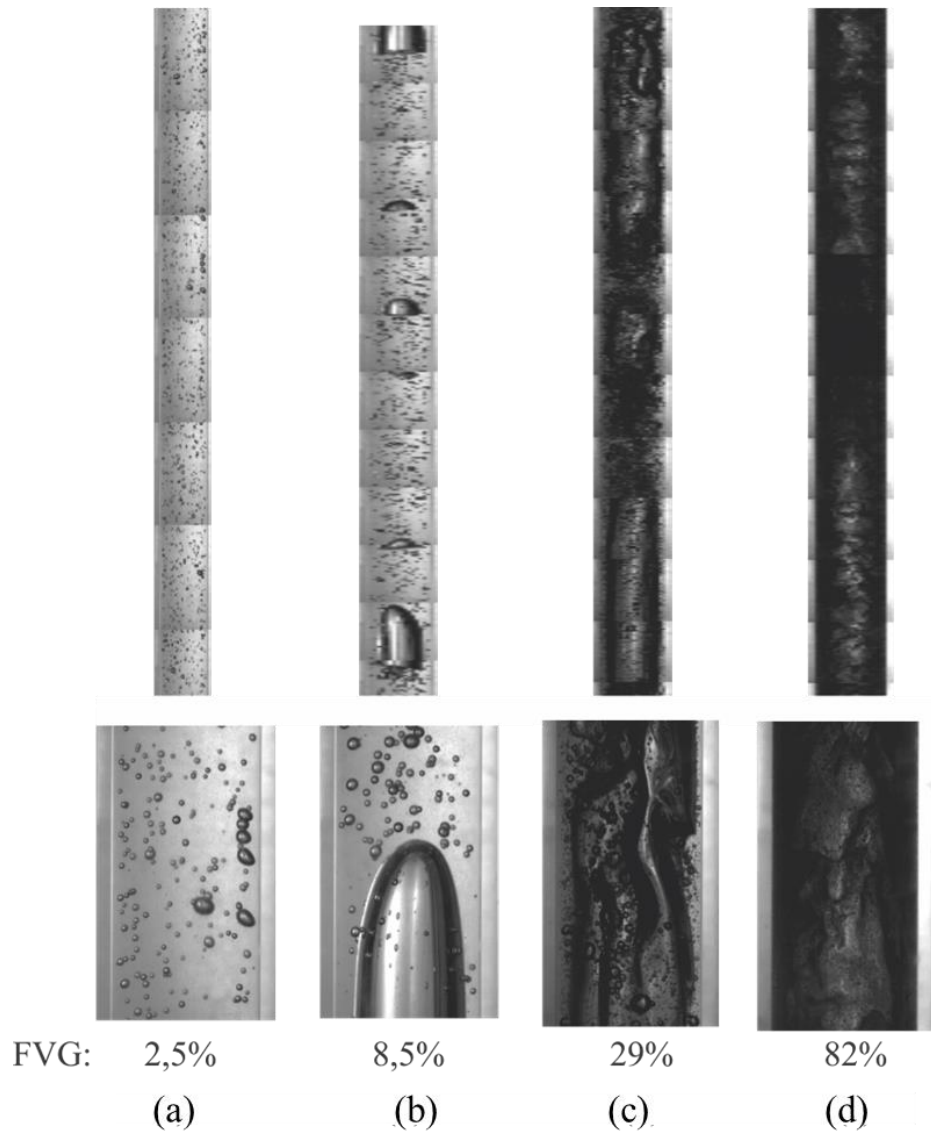


Figura 6.18. Evolução dos padrões de escoamentos na tubulação de uma polegada: (a) bolhas dispersas. (b) intermitente. (c) intermitente aerado. (d) intermitente/anular.

Tabela 6.2. Condições experimentais do escoamento líquido-sólido-gás.

FVG (%)	J_G (m/s)	J_L (m/s)	Características do Escoamento
2,5	0,0025	0,212	Bolhas Dispersas
8,5	0,0084	0,157	Intermitente
29	0,0199	0,230	Intermitente aerado
82	>0,0355	0,261	Intermitente/Anular

6.6.1 Padrão bolhas dispersas

Para gerar um escoamento de bolhas dispersas foram utilizadas velocidades superficiais de líquido e gás de $J_L = 0,212$ m/s e um $J_G = 0,0025$ m/s respectivamente, para uma FVG de 2,5%. A Figura 6.19 mostra as imagens adquiridas pela câmera e os ecos de ultrassom.

Ambas as técnicas mostram que existe uma concentração de bolhas dispersas maior nas extremidades da tubulação. Essa tendência é coerente com os trabalhos de Nakoryakov (1996) e Song (2001), em que são analisados escoamentos laminares ascendentes de bolhas dispersas de até 2 mm de diâmetro. Pelas imagens adquiridas, as bolhas presentes nesse experimento possuem de 0,5 mm a 2 mm de diâmetro.

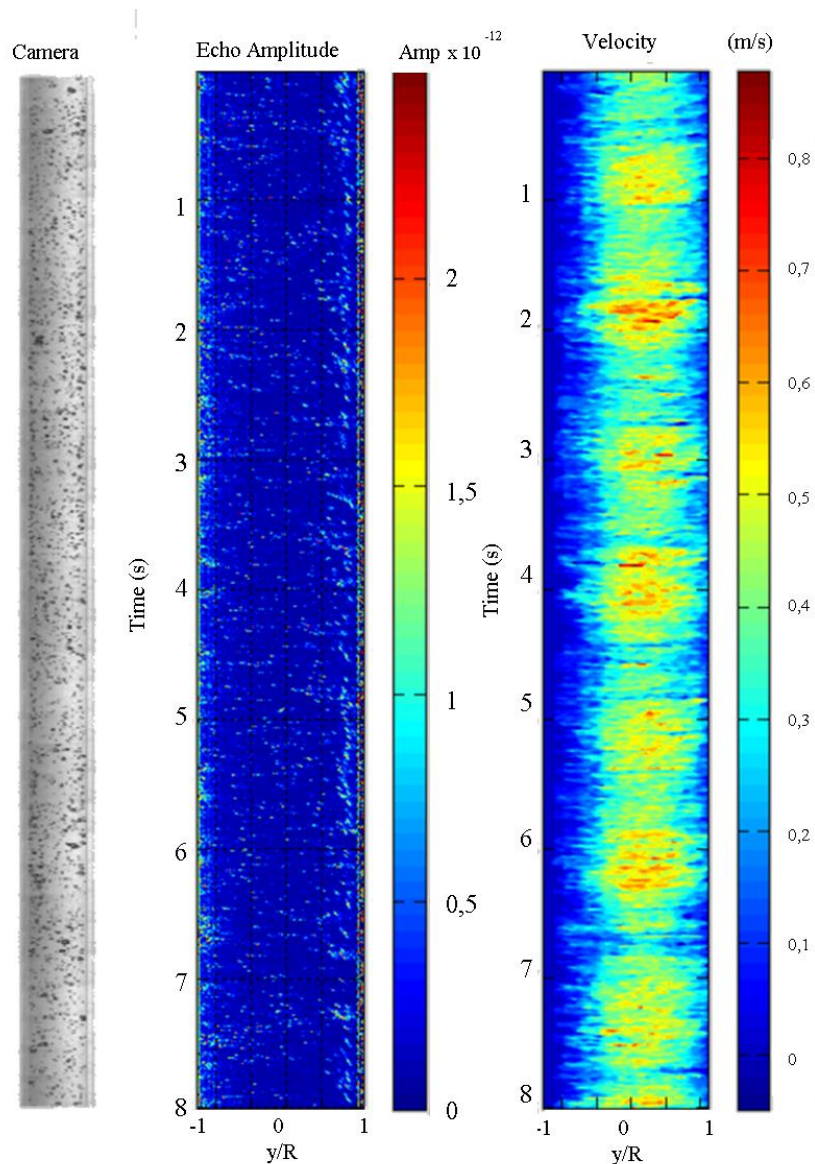


Figura 6.19. Imagem, M-Scan e perfil de velocidade de um trecho do escoamento óleo e areia no padrão bolhas dispersas.

A velocidade média e o perfil de velocidade ao longo do tempo são mostrados na Figura 6.20. Da mesma forma que nos experimentos mostrados anteriormente, a velocidade possui uma intermitência causada pela bomba centrífuga.

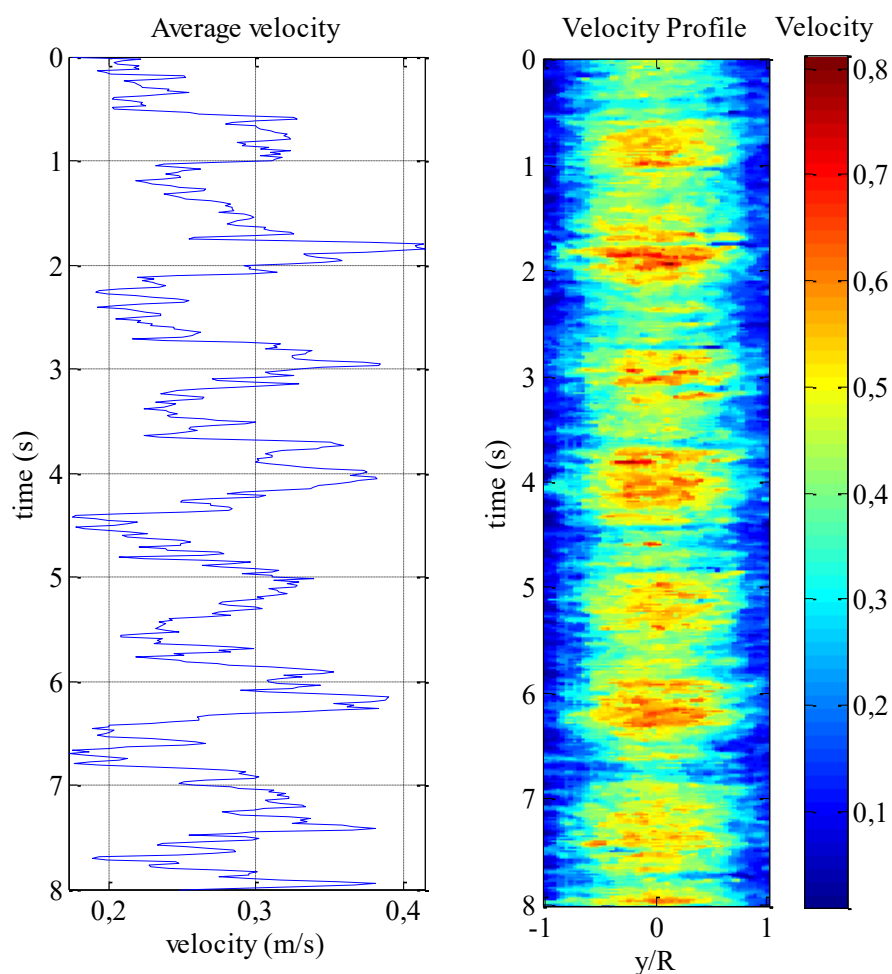


Figura 6.20. Velocidade média e o perfil de velocidade ao longo do tempo para um escoamento padrão bolhas dispersas.

A velocidade média obtida pela integração do perfil de velocidade, e a comparação com um perfil laminar teórico gerado a partir da velocidade da mistura J , são mostradas na Figura 6.21. A figura também mostra a velocidade média das bolhas dispersas medidas a partir das imagens. Foram selecionadas bolhas em cinco regiões diferentes para verificar o perfil de velocidade ao longo da tubulação. A técnica ultrassônica resultou em um perfil com velocidades maiores do que o perfil laminar teórico calculado. Esse resultado é coerente pois a técnica considera também a velocidade das bolhas dispersas que são maiores do que a velocidade da mistura em função do empuxo. As bolhas dispersas possuem um diâmetro de até 2 mm e o diâmetro ativo do transdutor de ultrassom possui 5 mm. Assim, as bolhas entram no volume de medição do ultrassom e são contabilizadas no perfil médio de velocidade. Outra característica observada são as velocidades nas bordas da tubulação. A técnica ultrassônica claramente obteve valores de velocidade maiores próximo as bordas da tubulação em comparação com um perfil

teórico. Isto pode ser explicado pela maior concentração de bolhas dispersas (que possuem velocidades maiores) próximo às paredes da tubulação conforme observado anteriormente.

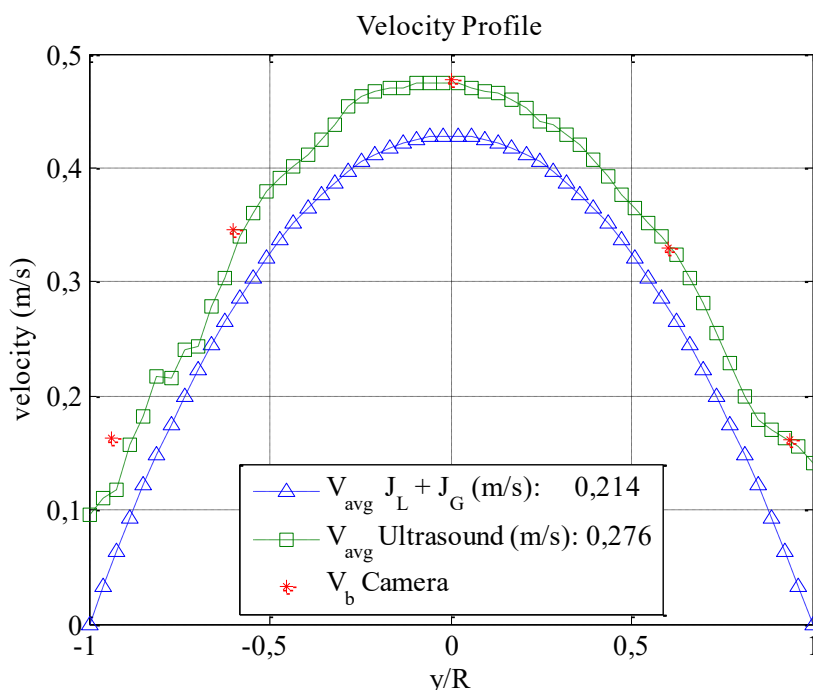


Figura 6.21. Perfis de velocidade medidas por ultrassom, em comparação com o perfil laminar teórico a partir da velocidade da mistura e velocidades das bolhas medidas pelas imagens.

A Figura 6.22 mostra a PDF das velocidades obtidas por ultrassom comparada a um perfil teórico de um escoamento laminar ideal considerando a velocidade média da mistura. Os valores de distribuição são semelhantes. Os valores de máximo são os mesmos, como por exemplo as velocidades próximas de 0,42 m/s, que representam as velocidades máximas do perfil da velocidade da mistura da Figura 6.21. Diferente do valor teórico ideal, as medidas por ultrassom possuem valores acima de 0,42 m/s que contribuem para que a velocidade média seja maior, provavelmente devido às bolhas dispersas.

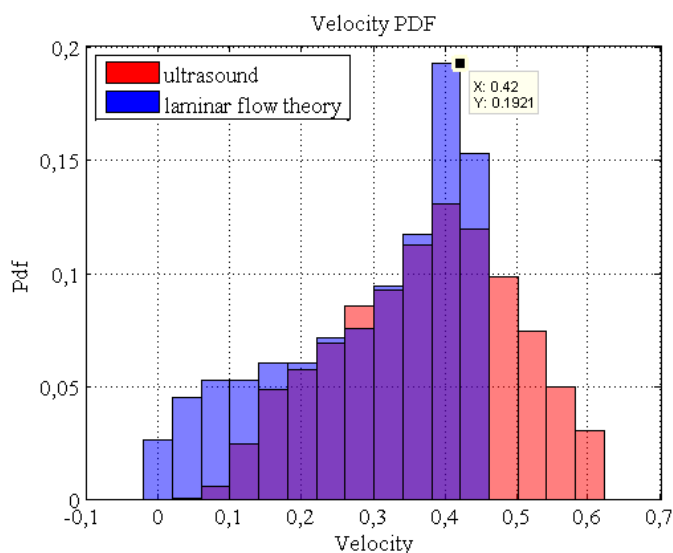


Figura 6.22. PDF das velocidades medidas por ultrassom e a PDF para um perfil laminar ideal.

Em teoria, as velocidades superficiais do líquido e do gás podem ser obtidas pela PDF das velocidades conforme os estudos de Aritomi (1996) e Murakawa (2005). A PDF obtida não mostra os mesmos picos distintos para velocidade de cada fase, como mostrados nos estudos referenciados. Porém, esses estudos foram realizados em escoamento água ar em regime turbulento. Para avaliar as diferenças entre as PDFs de um escoamento em regime laminar e turbulento, os perfis teóricos de ambos os regimes foram comparados como mostra a Figura 6.23.

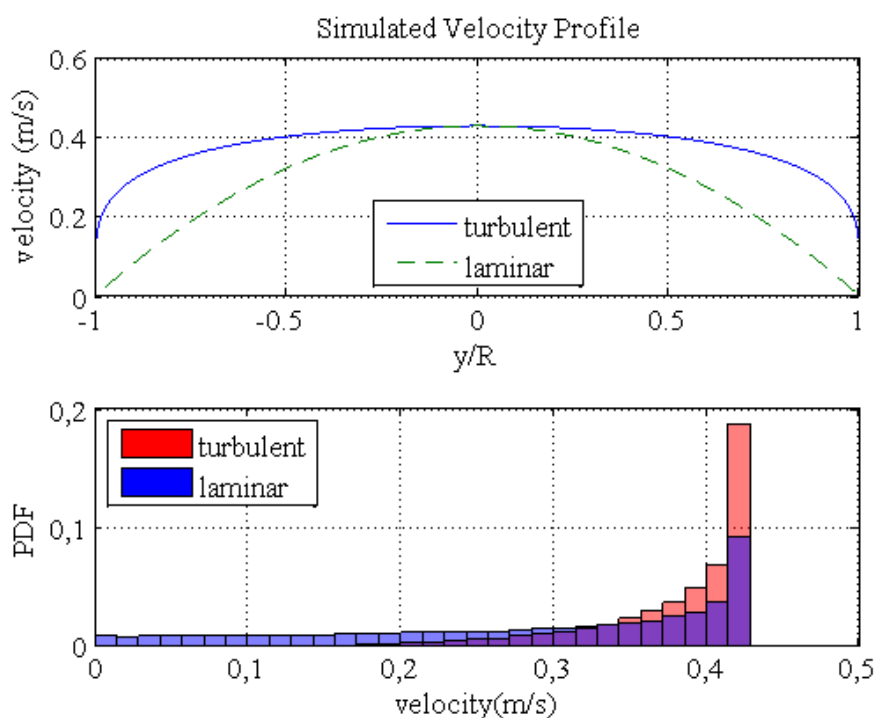


Figura 6.23. Comparação entre as PDFs dos perfis de velocidade turbulento e laminar.

Os gráficos mostram que as velocidades são mais distribuídas no regime laminar. No regime turbulento o perfil de velocidade tende a ser mais uniforme longe das paredes. Para avaliação de picos de PDF essa característica pode facilitar o reconhecimento da velocidade da fase líquida e da fase gasosa. Além disso, o transdutor de 4 MHz, com diâmetro ativo de 5 mm, utilizado neste trabalho, mede a velocidade das partículas e das bolhas (0.5 – 2mm). Como sugestão para melhorar a técnica e medir as velocidades superficiais do líquido e do gás separadamente, seria necessário utilizar dois transdutores com frequências e diâmetros distintos, como no trabalho de Murakawa (2005).

6.6.2 Padrão Intermitente

Para gerar um escoamento em regime intermitente de bolhas alongadas, foram utilizadas velocidades superficiais de líquido e gás de $J_L = 0,157$ m/s e $J_G = 0,0084$ m/s respectivamente, para uma FVG de 8,5%. A Figura 6.24 mostra imagens, o M-scan e o perfil de velocidade para um intervalo de 8 segundos. Nesse regime de escoamento, a intermitência entre bolhas alongadas e pistão de líquido tornam as medições de velocidade mais complexas. Além da dificuldade de se medir a velocidade do líquido e do gás separadamente, conforme estudado na seção anterior, é necessário reconhecer as bolhas alongadas do escoamento e separá-las da medição. As imagens da câmera e os M-scan mostram claramente o tamanho e o formato das bolhas alongadas. Com o perfil de velocidade obtido por ultrassom também é possível reconhecer a passagem da bolha alongada, devido aos valores negativos e positivos de velocidade. Essa característica será analisada posteriormente.

A Figura 6.25 mostra o reconhecimento de bolhas alongadas pela reflexão dos maiores ecos. Uma série temporal da distância entre a parede e o eco mais forte é gerada e pode ser aplicada no perfil de velocidade para selecionar as áreas de interesse. Trata-se de uma técnica que pode ser utilizada para complementar a medição de velocidade. Além disso, a velocidade da bolha alongada por ser medida pela técnica ultrassônica conforme Grangeiro (2010) e Ofuchi (2011). O reconhecimento do formato da bolha alongada e sua velocidade, integrados a técnica proposta, pode ser avaliado em trabalhos futuros.

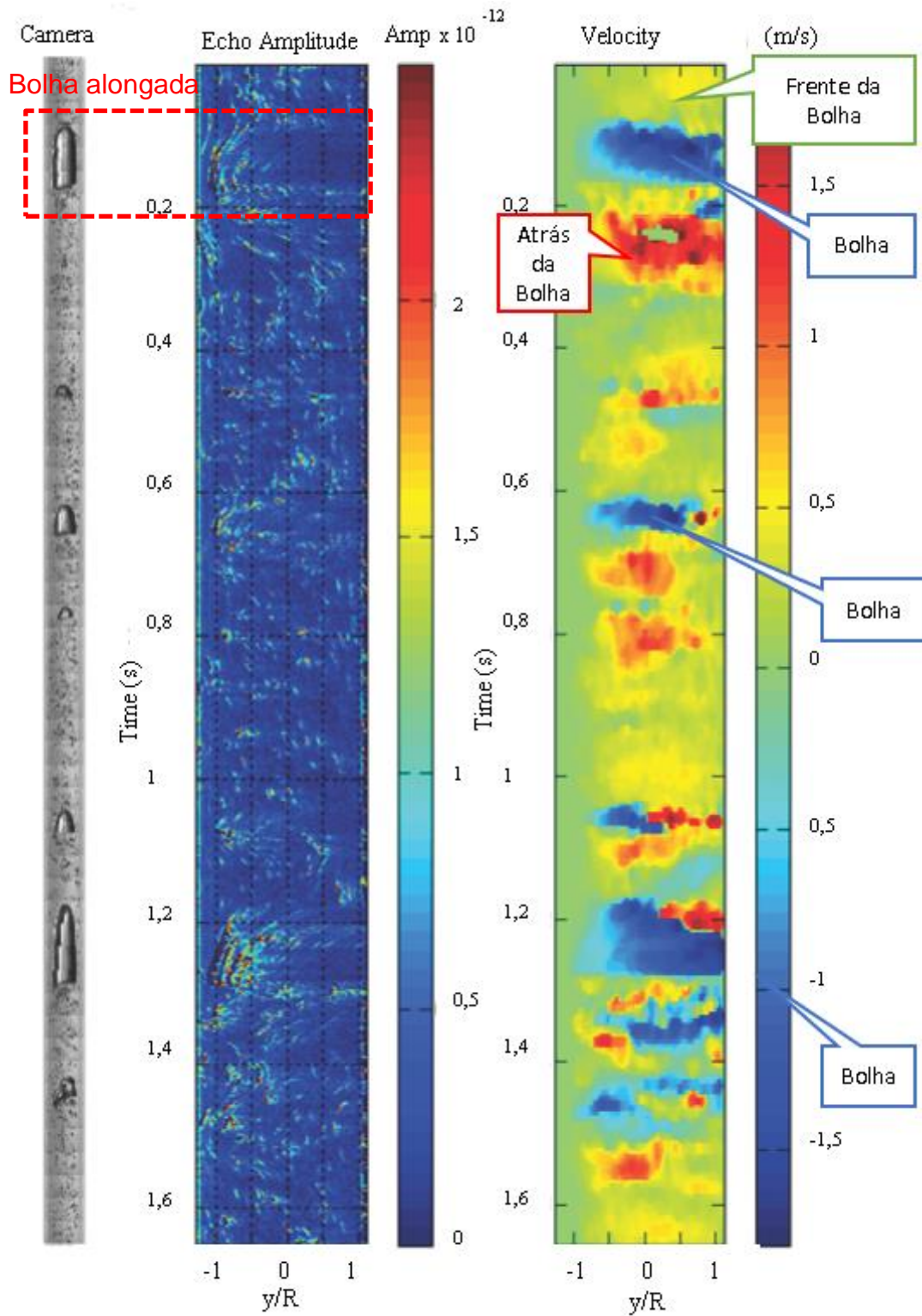


Figura 6.24. Imagem, Ecos de ultrassom e perfil de velocidade em um trecho do escoamento óleo e areia no padrão intermitente de bolhas alongadas.

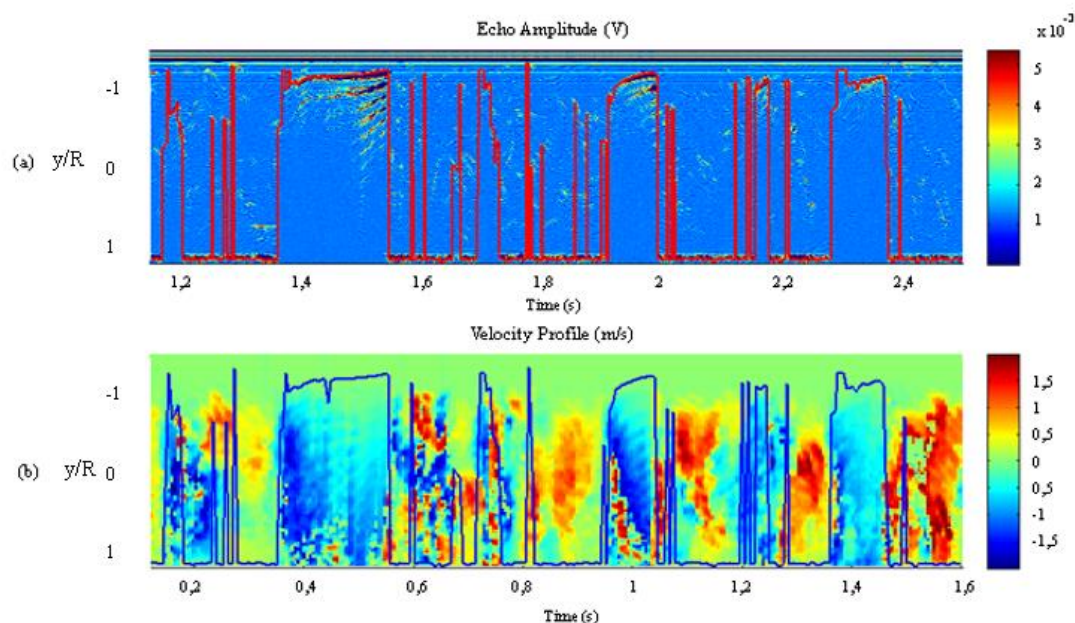


Figura 6.25 Reconhecimento de bolhas alongadas pela série temporal de distância entre o eco da parede e o maior eco subsequente. (a) Perfil de amplitude dos ecos sobreposta pela série temporal de distância. (b) Perfil de velocidade sobreposto pela série temporal de distância.

Para avaliar a causa das velocidades negativas e positivas medidas pelo ultrassom durante a passagem da bolha alongada é necessário lembrar do princípio de medição ilustrada na Figura 2.10. O pequeno deslocamento da partícula e a consideração a priori de que a velocidade ocorre no sentido vertical são a base da técnica. Como o transdutor está angulado a favor do escoamento, o movimento de afastamento do refletor é uma velocidade a favor do fluxo e o movimento de aproximação do refletor é uma velocidade contra o fluxo (Figura 6.26). Considerando esse contexto, a reflexão gerada pela interface do líquido com a bolha alongada pode se confundir com o movimento de uma partícula se afastando ou se aproximando rapidamente como mostra um dos trechos do escoamento analisado (Figura 6.27a). Outra situação que foi visualmente verificada no escoamento são os vórtices criados logo após a passagem da bolha alongada. As partículas acompanham o movimento de rotação do vórtice e criam velocidades maiores devido ao movimento de afastamento e aproximação do transdutor (Figura 6.27b).

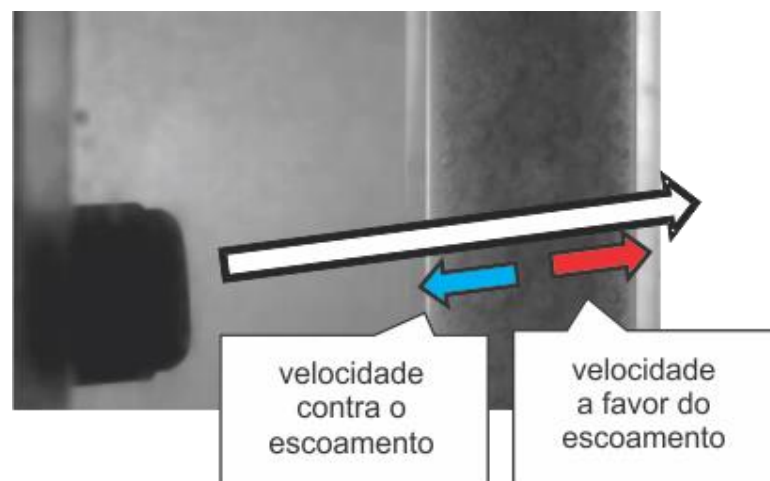


Figura 6.26. Movimento da partícula para indicar o sentido da velocidade.

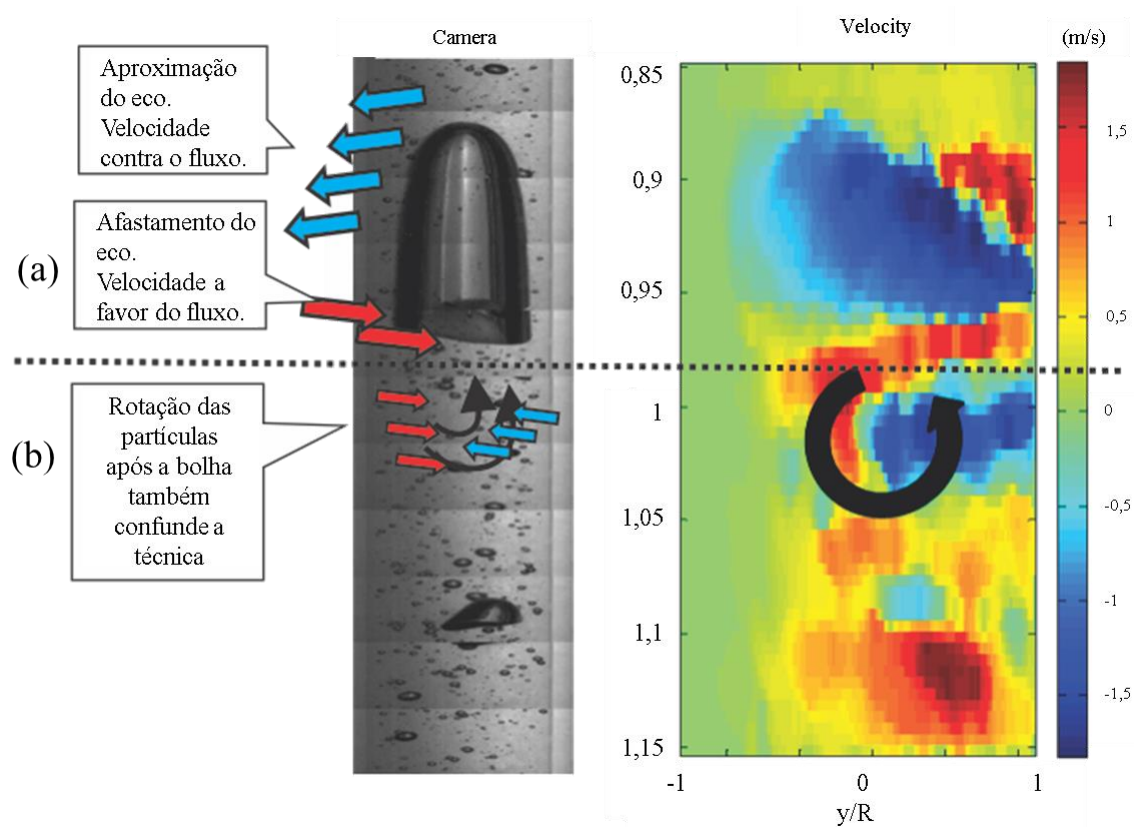


Figura 6.27. Relação entre as velocidades medidas por ultrassom e a passagem da bolha alongada. (a) Erros devido ao formato da bolha alongada. (b) Erros devido ao vórtice logo após a passagem da bolha alongada.

A ambiguidade entre a velocidade vertical e a velocidade lateral dos refletores pode ser amenizada com o uso de mais transdutores em diferentes regiões da tubulação. Desta forma seria possível medir um campo de velocidades em duas dimensões, restando apenas uma dimensão como incerteza. Uma outra possível solução seria identificar as velocidades características da passagem da bolha alongada e desconsiderá-las da medição total, medindo apenas as regiões que se assemelham ao padrão bolhas dispersas. A Figura 6.28 ilustra as

imagens adquiridas, o M-scan e o perfil de velocidade medidos por ultrassom de um trecho do escoamento intermitente em que existem apenas bolhas dispersas.

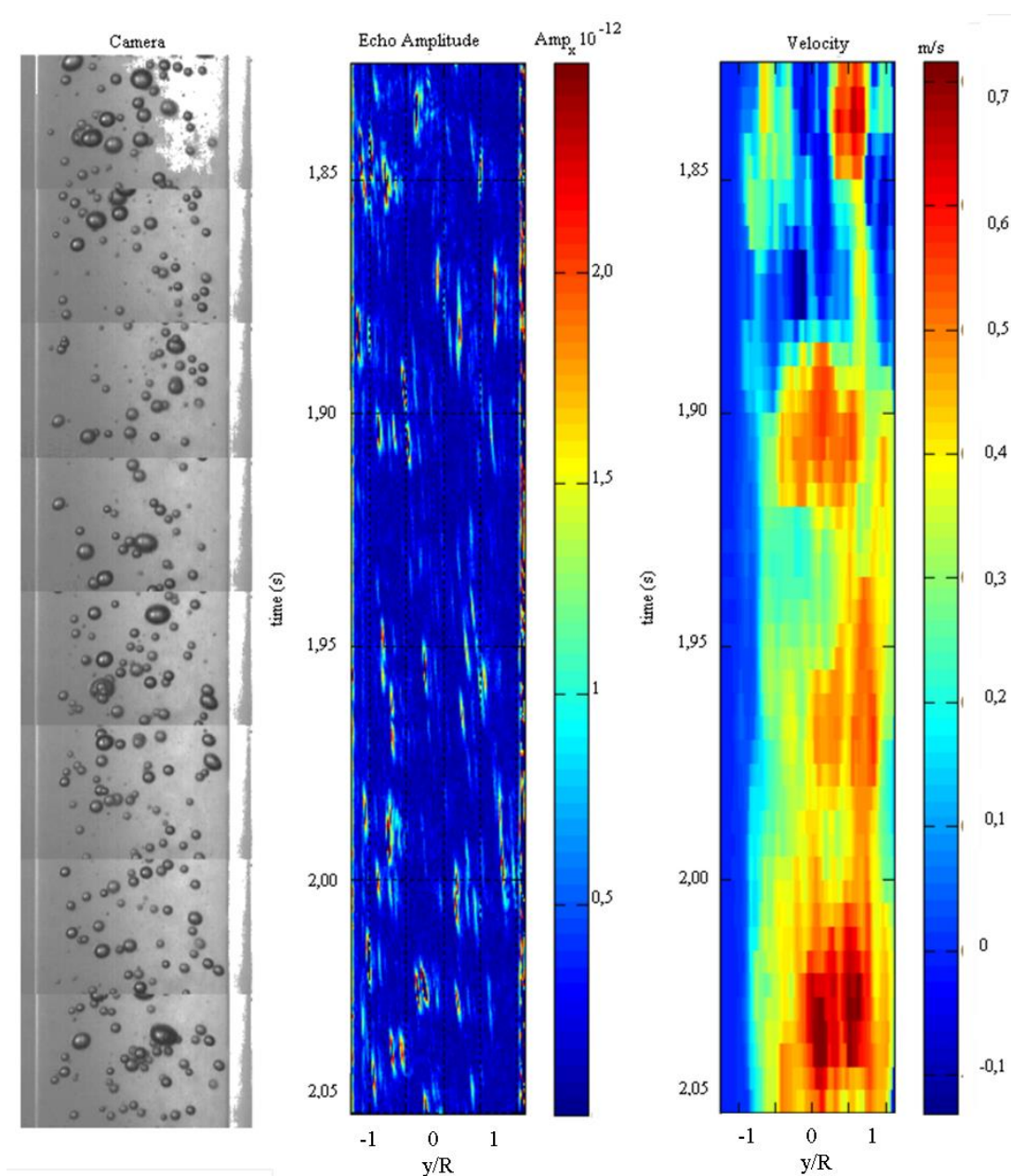


Figura 6.28. Imagem, M-scan e perfil de velocidade da região de bolhas dispersas do escoamento no padrão intermitente de bolhas alongadas.

Para avaliar a medição apenas deste tipo de padrão de escoamento, as regiões de bolhas dispersas foram separadas manualmente dos dados originais para se gerar um perfil de velocidade médio. Esse perfil é comparado com o perfil original como mostra a Figura 6.29. Os valores mostram que separando somente a região de bolhas dispersas a medição é similar ao experimento anterior de escoamentos padrão bolhas dispersas. Os resultados foram confrontados com medidas da câmera de alta velocidade e do perfil laminar teórico da velocidade da mistura. A velocidade medida por ultrassom apresentou valores mais altos do

que o perfil de velocidade teórico e se mostrou muito próximo aos valores obtidos pela câmera de alta velocidade de velocidade de bolhas.

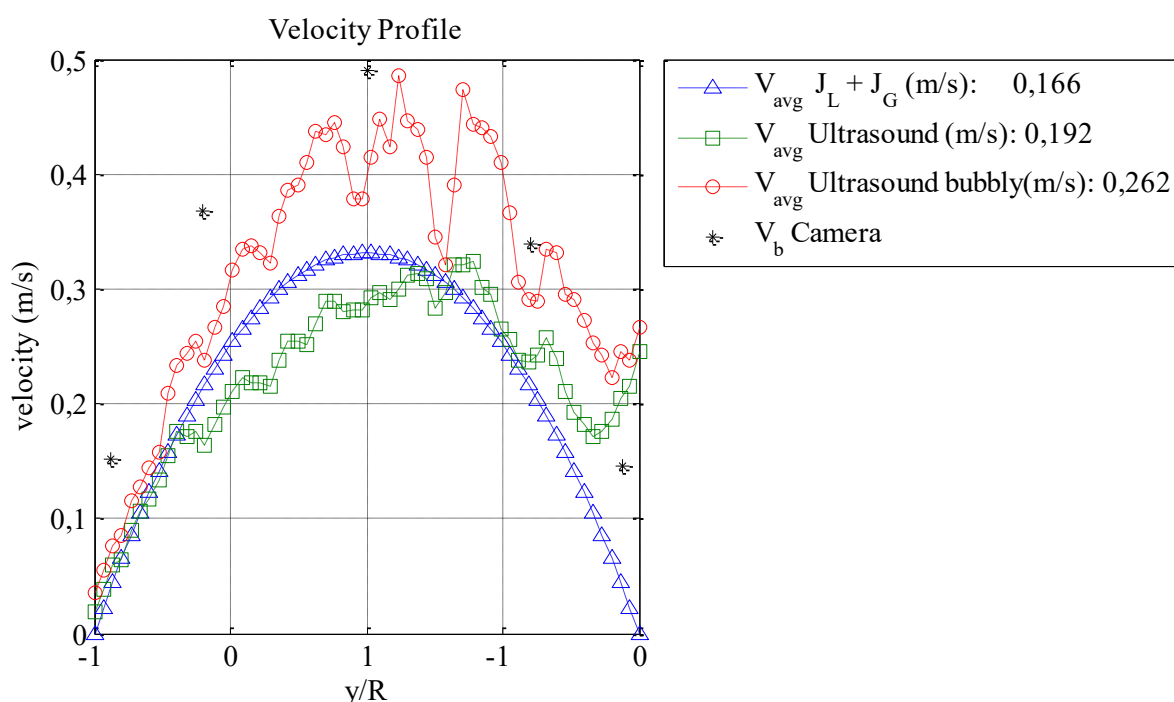


Figura 6.29. Comparação entre o perfil de velocidade medida por ultrassom (original e apenas bolhas dispersas), o perfil de velocidade de um escoamento laminar teórico baseado na velocidade média da mistura e a velocidade das bolhas medidas por imagem.

Outra análise dos dados de velocidade pode ser feita utilizando a PDF das velocidades. A Figura 6.30a mostra a densidade de probabilidade (normalizada pelo valor máximo) das velocidades por ultrassom de todo o escoamento e somente da região de bolhas dispersas, comparando com o perfil teórico laminar gerado a partir da velocidade da mistura. Apesar de possuírem densidades de probabilidade diferentes os três gráficos são muito similares. O valor do pico das densidades são os mesmos, sendo que esse representa a região próxima da velocidade máxima do perfil do escoamento laminar calculado pela velocidade da mistura. Isto também é mostrado na Figura 6.30(a,b). Essa mesma característica das PDFs também foi observada na seção anterior, para escoamentos de bolhas dispersas. Esses indícios mostram que as PDFs das velocidades medidas por ultrassom podem conter informações de interesse a respeito da velocidade da mistura no escoamento gás-líquido.

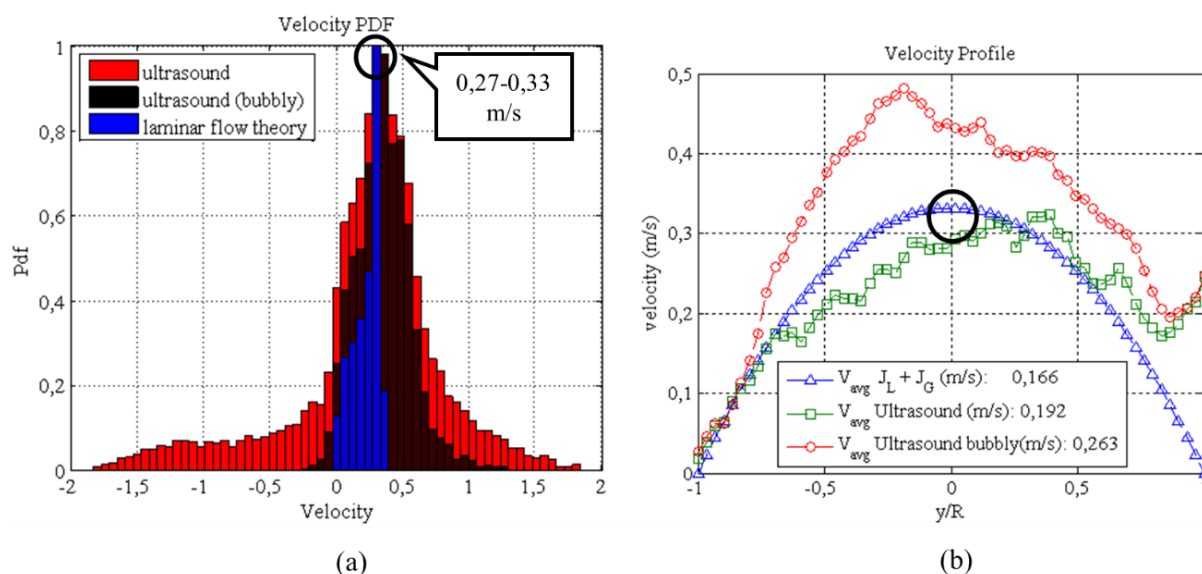


Figura 6.30. Comparação entre o perfil de velocidade medida por ultrassom (original e apenas bolhas dispersas), o perfil de velocidade de um escoamento laminar teórico baseado na velocidade média da mistura e a velocidade das bolhas medidas por imagem. (a) PDF normalizada pelo valor máximo. (b) Perfil de velocidade.

6.6.3 Padrão Intermitente Aerado

O padrão intermitente tem como característica a passagem de uma bolha alongada seguido de um pistão de líquido. Para a técnica ultrassônica é importante também avaliar a quantidade de bolhas dispersas no pistão de líquido. Uma grande quantidade de bolhas dispersas pode atenuar muito o sinal de ultrassom e tornar as medidas inviáveis. Nesse contexto, foi avaliado um padrão intermitente aerado, em que foi utilizado $J_L = 0,230$ m/s e $J_G = 0,0199$ m/s para uma FVG de 29%. A diferença entre o escoamento estudado nessa seção para o escoamento da seção anterior pode ser claramente observada na Figura 6.31. A quantidade de bolhas dispersas no pistão de líquido aumenta significativamente. A vazão de gás e líquido foi elevada para gerar esse padrão de escoamento. Como consequência as bolhas alongadas ocupam um volume maior do escoamento como mostra a Figura 6.32.

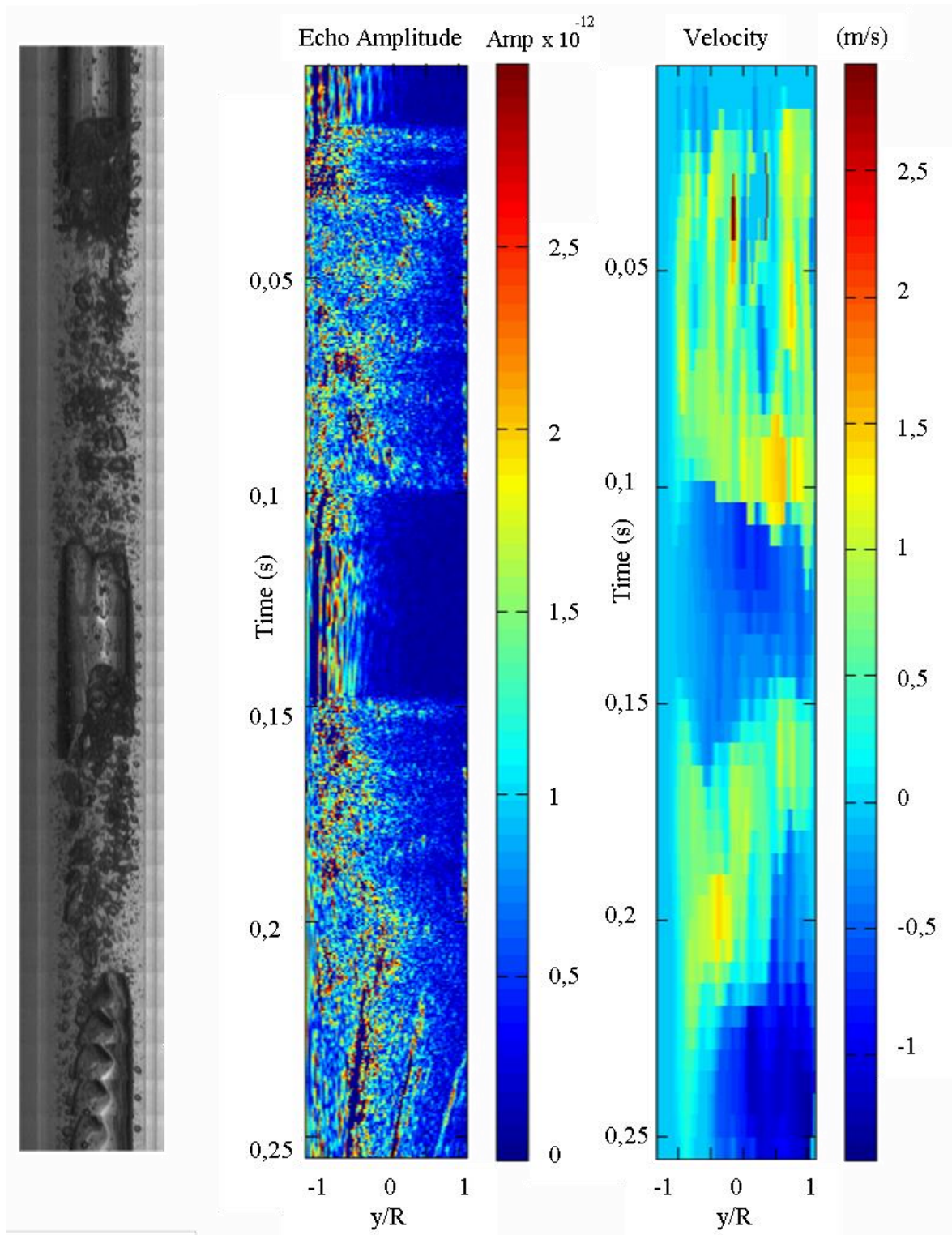


Figura 6.31. Imagem, M-Scan e velocidade de um escoamento óleo e areia no padrão intermitente aerado.

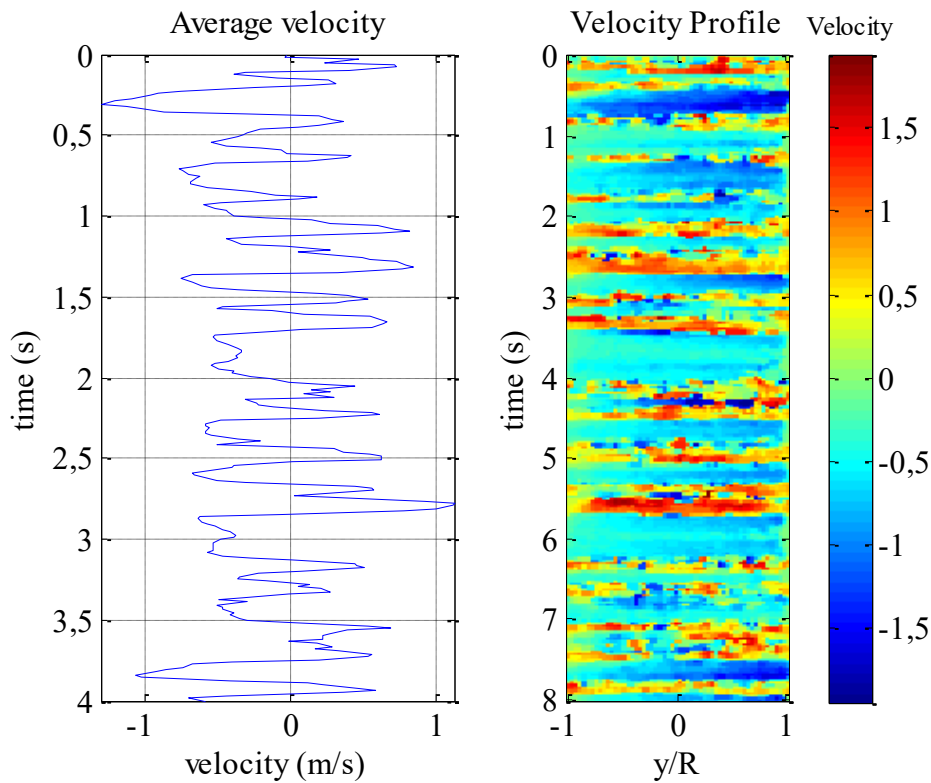


Figura 6.32. Velocidade média e o perfil de velocidade ao longo do tempo para um escoamento padrão intermitente aerado.

As regiões de bolhas dispersas são breves e contém uma grande fração de vazio. Nesse contexto, foram selecionados alguns trechos para medição tanto com a técnica de ultrassom quanto por imagem utilizando a câmera de alta velocidade. Os perfis de velocidade são mostrados na Figura 6.33.

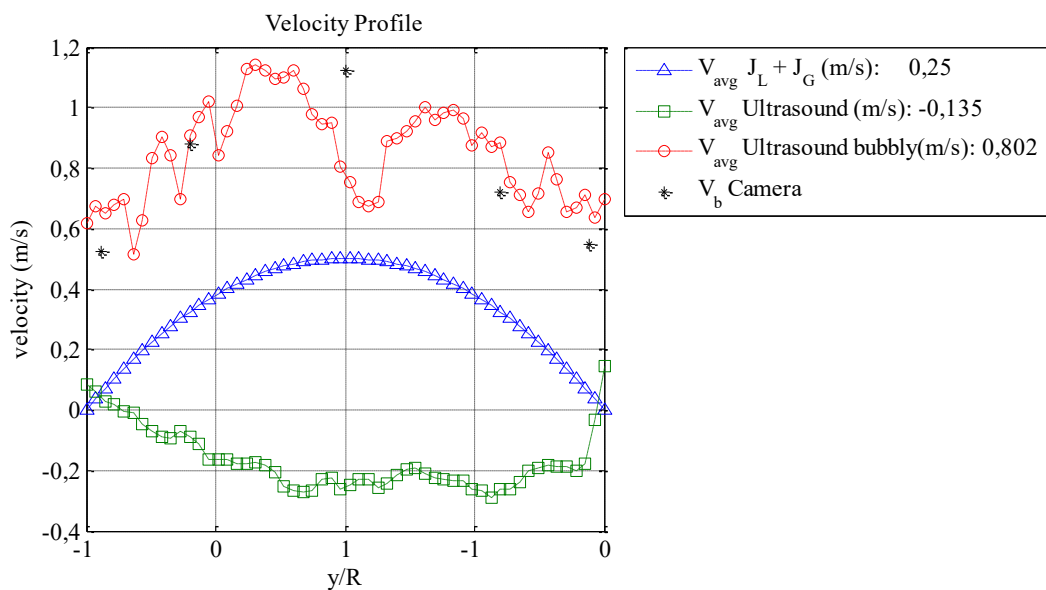


Figura 6.33. Velocidade média medida no trecho de bolhas dispersas do escoamento pistonado instável.

O perfil de velocidade por ultrassom de todo o escoamento mostra valores negativos, devido à grande quantidade de bolhas alongadas. Na região de bolhas dispersas, foram medidas velocidades maiores, tanto pelas técnicas por imagem quanto por ultrassom. Apesar do cenário difícil de medição, ainda é possível medir velocidades coerentes das bolhas dispersas com o ultrassom. O perfil de velocidade teórico de um escoamento laminar serve apenas como referência comparativa com os outros experimentos.

Para analisar a distribuição das velocidades do escoamento foi gerado o gráfico das PDFs, conforme mostra a Figura 6.34. No gráfico é possível observar que as distribuições possuem seu centro em regiões distintas de velocidade. A PDF das velocidades medidas por ultrassom em todo o escoamento aponta para o predomínio de velocidades negativas. Isto ocorre devido à grande quantidade de bolhas alongadas em que as velocidades medidas são negativas. No caso da PDF das velocidades selecionadas nos trechos em que o escoamento tem padrão bolhas dispersas, a distribuição tem como tendência velocidades maiores. Isto demonstra que as bolhas dispersas têm maior influência nas medições do que as partículas refletoras. Esse resultado é coerente pois a fração de vazio deste experimento é muito maior do que a observada no experimento anterior. Assim, foi verificado que nesse padrão de escoamento intermitente aerado a técnica ultrassônica pode somente medir a velocidade das bolhas dispersas.

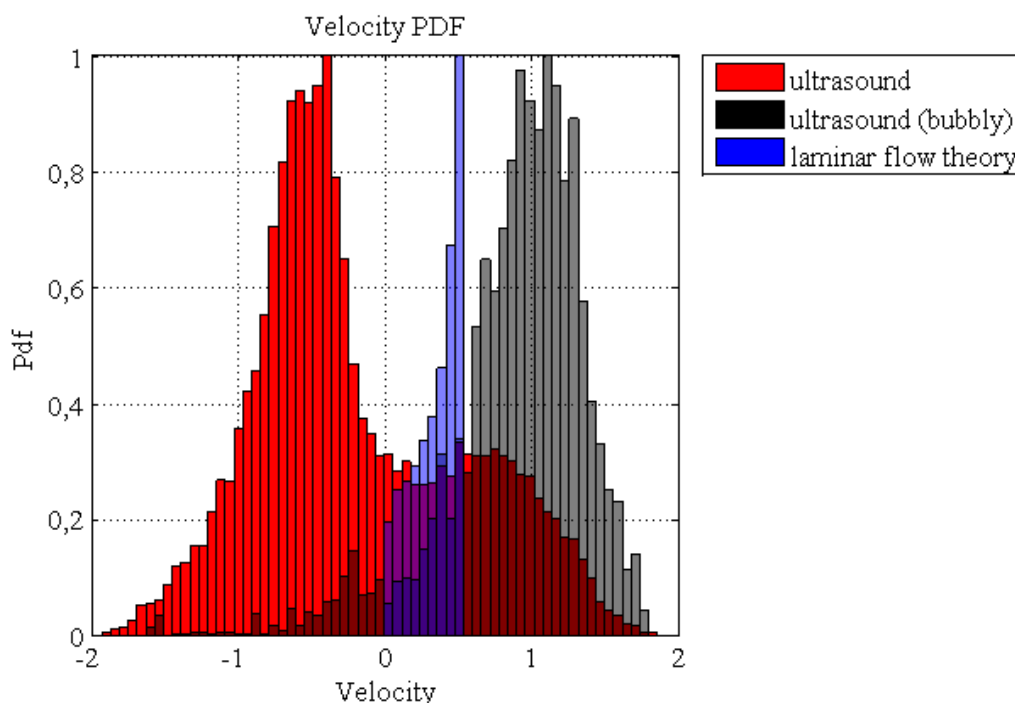


Figura 6.34. PDFs das velocidades no padrão intermitente aerado, medidas por ultrassom (original e o trecho de bolhas dispersas) e de um perfil teórico para um escoamento laminar.

6.6.4 Padrão Intermitente/Anular

Para gerar um escoamento no padrão intermitente, quase anular, foi utilizado $J_L = 0,261$ m/s e $J_G = 0,0355$ m/s para uma FVG de 82%. Apesar da alta fração de vazio, não foi possível gerar um escoamento anular devido a intermitência da bomba, como é verificado na Figura 6.35.

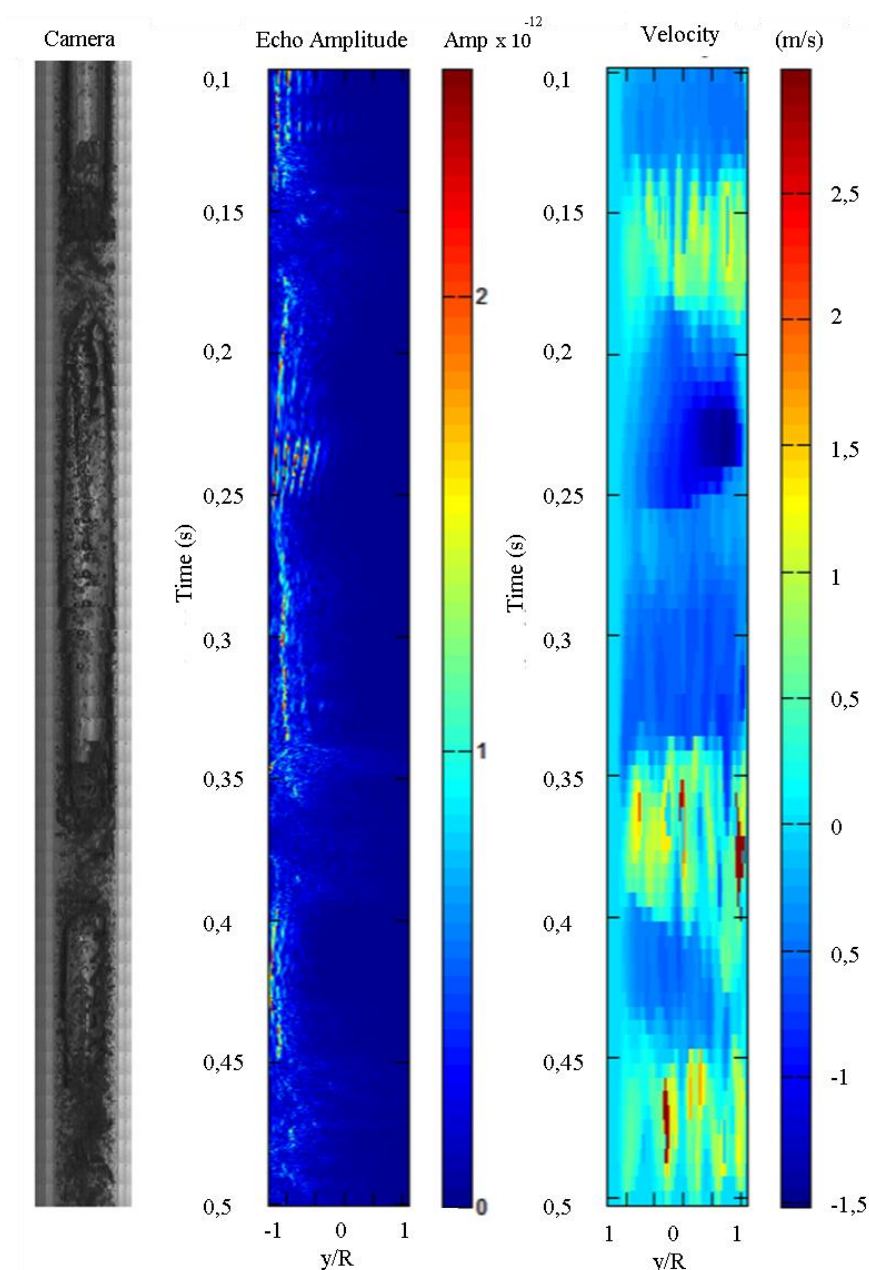


Figura 6.35. Imagem, ecos de ultrassom e perfil de velocidade do escoamento óleo e areia no padrão intermitente/anular.

Na situação de um escoamento anular, somente a velocidade do filme de líquido poderia ser medida com a técnica ultrassônica. Assim, foram separados alguns trechos de bolha alongada para avaliar o filme de líquido entre a parede e o gás. A Figura 6.36 mostra um trecho

em que a bolha alongada possui bolhas dispersas ao seu redor. Essas pequenas bolhas serão utilizadas para medir a velocidade do filme por imagem e posteriormente comparadas com a velocidade do filme medido por ultrassom.

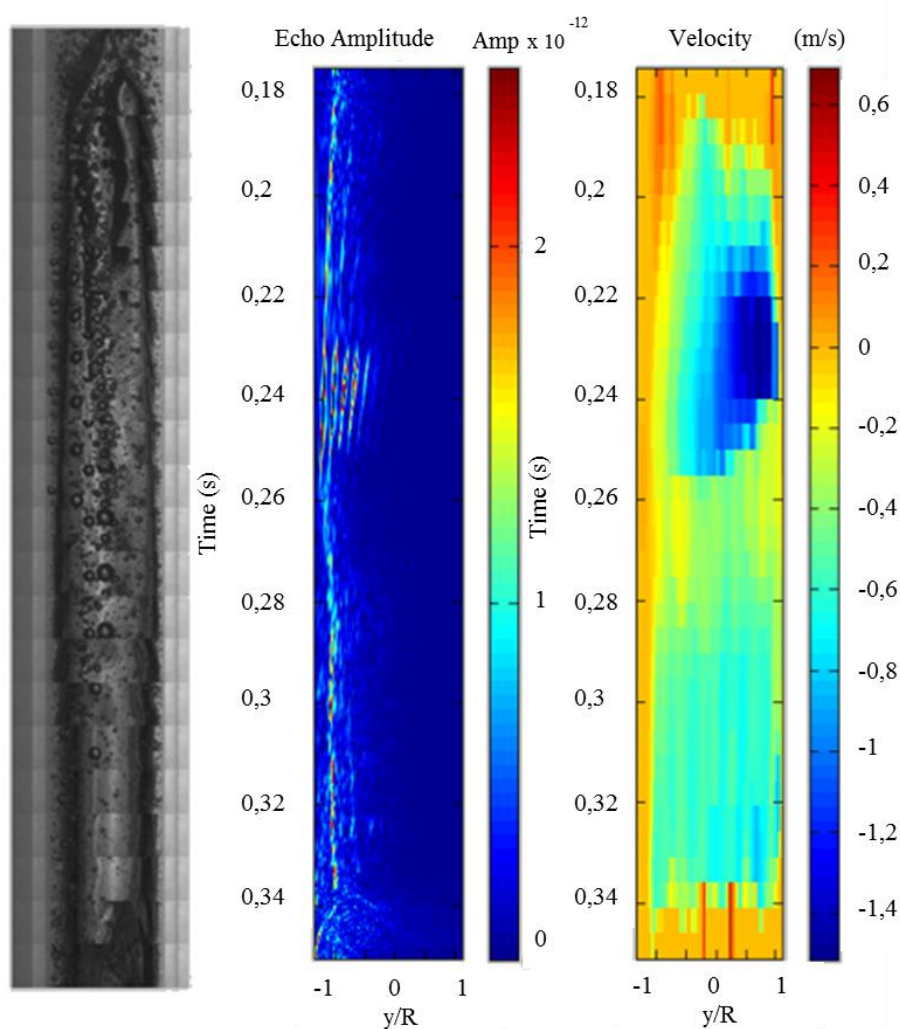


Figura 6.36. Imagem, M-scan e perfil de velocidade do escoamento óleo e areia no padrão intermitente/anular (apenas a bolha alongada).

Baseado na análise das imagens, é possível observar que próximo do início da bolha alongada, a velocidade é a favor do fluxo. Conforme a bolha alongada se desenvolve, a velocidade do filme de líquido inverte de sentido. Próximo a cauda da bolha a velocidade volta ao sentido original. Uma comparação entre as velocidades medidas por ultrassom e por imagem ao longo do tempo é mostrada na Figura 6.37. O trecho medido por ultrassom representa uma profundidade de aproximadamente 1,5 mm, enquanto que pelas imagens foram selecionadas bolhas dispersas próximas à parede da tubulação. O resultado mostra que os valores de velocidade medidos por ultrassom são coerentes às velocidades das bolhas observadas por imagem.

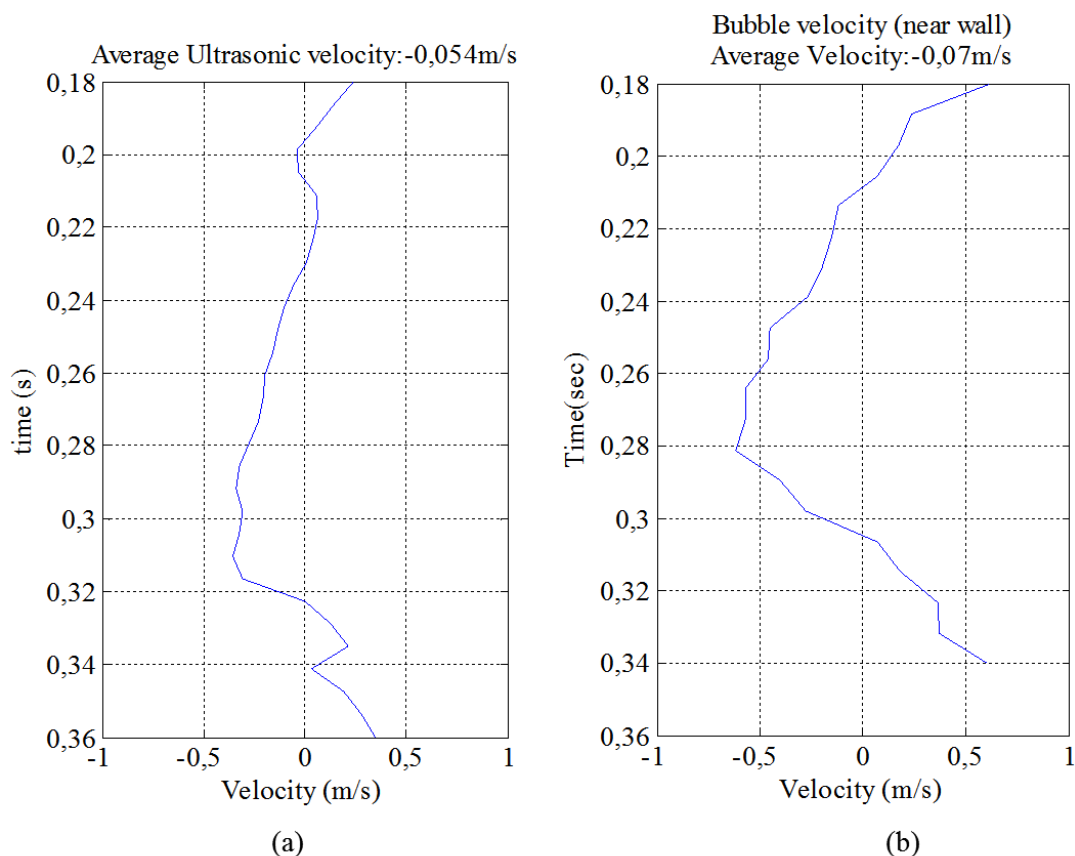
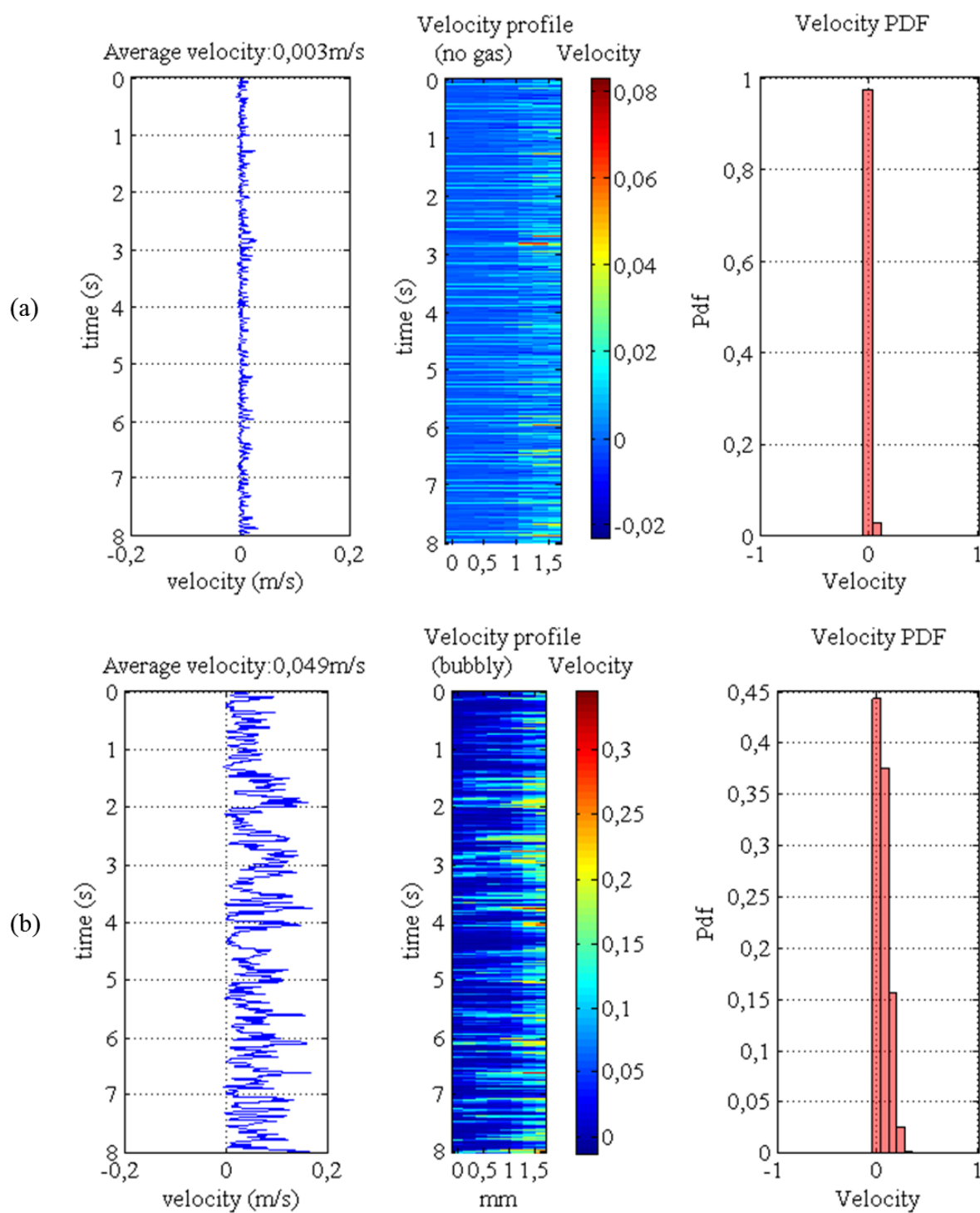


Figura 6.37. Perfil de velocidade (a) Ultrassom (b) Câmera.

Além de avaliar o filme de líquido para uma bolha alongada, foram analisadas também as velocidades próximas a parede da tubulação em todos os padrões de escoamento estudados neste trabalho. Esses experimentos têm como objetivo avaliar em detalhes a velocidade do líquido nos diferentes contextos e assim validar as medições de filme. A Figura 6.38 mostra os gráficos de velocidade média ao longo do tempo e também outros parâmetros como perfil de velocidade e a PDF. Primeiramente, foi avaliado a velocidade próximo a parede para um escoamento sem a presença de gás. O estudo mostra que a velocidade é muito próxima de zero, o que é o resultado esperado para esse experimento. No escoamento no padrão bolhas dispersas, a passagem de bolhas dispersas próximas a parede gera velocidades um pouco maiores. Esse fenômeno também é observado pela técnica ultrassônica. Em um escoamento intermitente, as velocidades do filme mudam de sentido devido à passagem da bolha alongada. No último experimento, o escoamento intermitente de maior velocidade superficial do líquido, maior velocidade superficial do gás e maior fração de vazio, ocorre o mesmo comportamento de inversão de sentido de velocidades. Porém, as velocidades são mais altas em ambos os sentidos. Pela PDF das velocidades é possível avaliar que as distribuições de velocidades ocorrem em

uma faixa mais larga. Todos os resultados se mostraram coerentes com a realidade dos escoamentos avaliados.



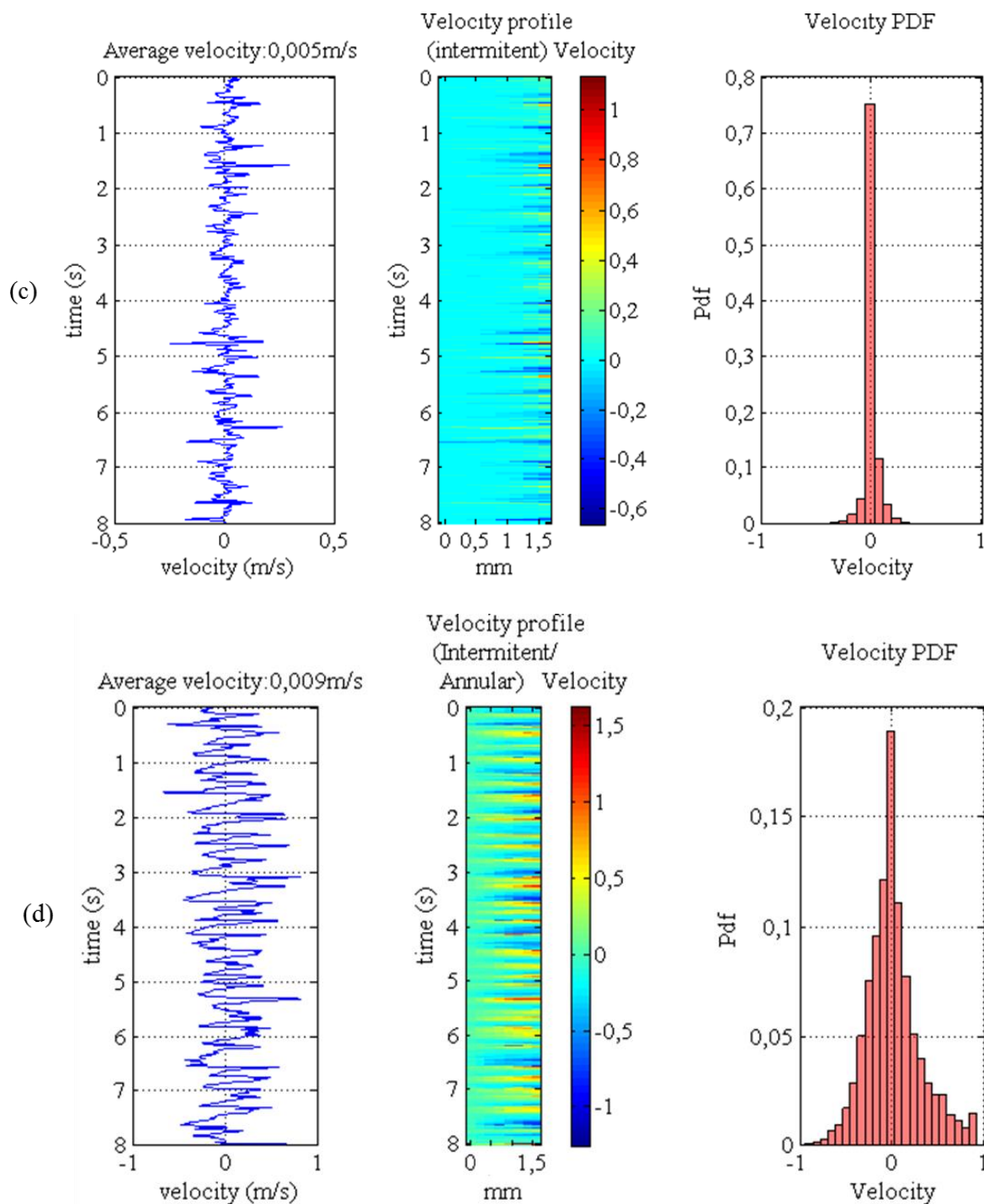


Figura 6.38. Velocidade média, perfil de velocidade e PDFs das velocidades para um escoamento óleo, partículas e ar próximo a parede da tubulação (0-1,5mm). (a) Escoamento sem gás. (b) Escoamento no padrão bolhas dispersas. (c) Escoamento no padrão intermitente. (d) Escoamento no padrão intermitente/anular.

6.7 RESUMO DOS RESULTADOS

Os principais resultados observados para os experimentos em escoamentos em tubulação vertical são resumidos a seguir:

- Escoamento sem a presença de gás: validação da técnica ultrassônica utilizando pulsadores de END para medição de escoamentos sem a presença de gás com resultados próximos ao medidor Coriolis.
- Escoamento padrão bolhas dispersas: O transdutor utilizado mede a velocidade das partículas e das bolhas simultaneamente, o que gera uma magnitude de velocidade média maior do que o esperado pelo perfil teórico monofásico. No experimento realizado, as velocidades medidas foram similares a velocidade das bolhas dispersas medidas pela câmera. Não foi possível distinguir as velocidades superficiais de cada fase, porém, existe uma tendência de que a velocidade da mistura pode ser obtida pela análise da PDF das velocidades.
- Escoamento Intermitente: Nesse padrão de escoamento é necessário separar as regiões de bolha alongada e pistão de líquido. Desta forma, a velocidade das bolhas dispersas no pistão de líquido é medida pela técnica ultrassônica. Caso o escoamento não seja muito aerado pode ser possível também obter a velocidade da mistura analisando a PDF das velocidades.
- Escoamento Intermitente Aerado: Nesse padrão de escoamento somente a velocidade das bolhas dispersas no pistão de líquido é medida. Além disso a medição só é possível caso os dados do pistão de líquido seja previamente separado da bolha. Não é possível obter a velocidade da mistura analisando a PDF das velocidades nesse caso.
- Escoamento anular: Apesar do escoamento anular não ter sido efetivamente gerado, a capacidade da técnica ultrassônica de medir filmes de líquido foi testada com sucesso em todos os padrões de escoamento. Desta forma uma possível medição de filme no padrão anular tem grandes chances de também ser mensurado corretamente. A Tabela 6.3 mostra um resumo dos pontos observados:

Tabela 6.3. Resumo dos parâmetros mensuráveis nos padrões de escoamento estudados.

Padrão de escoamento	Parâmetros mensuráveis
Sem Gás	Perfil de velocidade do líquido
Bolhas dispersas	Perfil de velocidade das bolhas dispersas, velocidade da mistura
Intermitente	Perfil de velocidade das bolhas dispersas*, velocidade da mistura
Intermitente aerado	Perfil de velocidade das bolhas dispersas*
Anular	Velocidade do filme de líquido
*	Necessita separação entre os dados de bolha alongada e pistão de líquido

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1 PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS

Neste trabalho foi investigado a técnica de ultrassom Doppler para estimação de velocidade utilizando equipamentos END (pulsador/receptor). Tais equipamentos são mais acessíveis do que equipamentos convencionais de medição de velocidade por ultrassom. Também foi proposto o uso da técnica de autocorrelação estendida (EAM) para medição de velocidades mais altas. Essa técnica combina dois estimadores de velocidade amplamente conhecidos na área, a autocorrelação (ACM) e a correlação cruzada (CCM), possibilitando a medição de velocidades além do limite de Nyquist com uma performance computacional melhor do que o CCM. Também foi desenvolvido um sistema de processamento e medição de velocidade utilizando linguagem LabView. O pulsador END e o estimador de velocidade por EAM foram validados medindo o perfil de velocidade de um cilindro girante, capaz de fornecer velocidades controladas e de fácil solução analítica. Os resultados mostram erros médios quadráticos abaixo de 2% validando o equipamento e a técnica, mesmo em velocidades acima do limite de Nyquist.

Na segunda parte deste trabalho, a técnica ultrassônica Doppler e o pulsador END foram utilizados para medir o perfil de velocidade de um escoamento multifásico líquido-sólido-gás. Primeiramente, a velocidade do escoamento líquido-sólido em regime laminar foi medido e validado por um medidor Coriolis como referência. Em seguida, foram realizados testes adicionando gás ao escoamento e variando as velocidades superficiais de líquido e gás para gerar os padrões de bolhas dispersas, intermitente, intermitente aerado e intermitente/quase anular. Os resultados foram comparados a imagens de uma câmera de alta velocidade e podem ser resumidos aos seguintes tópicos:

- Bolhas dispersas: A técnica mede a velocidade das partículas e das bolhas simultaneamente, o que gera uma magnitude de velocidade média maior do que o esperado pelo perfil teórico monofásico. Utilizando a PDF das velocidades medidas, foi observada uma tendência de que a velocidade da mistura pode ser obtida.
- Intermitente: Nesse padrão de escoamento é necessário separar as regiões de bolha alongada e pistão de líquido. Desta forma, a velocidade das bolhas dispersas no pistão de líquido é medida pela técnica ultrassônica. Caso o escoamento

não seja muito aerado pode ser possível também obter a velocidade da mistura analisando a PDF das velocidades.

- Intermitente aerado: O excesso de bolhas no pistão de líquido degrada o sinal de ultrassom tornando quase inviável a medição.
- Anular/Filme de líquido: Esse padrão de escoamento não foi obtido na planta experimental. Porém, a capacidade da técnica ultrassônica de medir filmes de líquido foi testada com sucesso em todos os outros padrões de escoamento, o que indica que a técnica possa ser empregada também no padrão anular.

Por fim, este trabalho contribui para a comunidade científica atuante na área de fluidodinâmica, com uma ferramenta ultrassônica de melhor desempenho e mais acessível para a medição de perfil de velocidade.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado nos resultados obtidos nesta tese, duas linhas distintas de pesquisas futuras são apresentadas. A primeira envolve novas possibilidades para a medição de perfil de velocidade por ultrassom e a aplicação da técnica da autocorrelação estendida em outras áreas. A segunda foca na evolução da medição multifásica com o ultrassom.

7.2.1 Novas aplicações

- Utilização de novos métodos para geração de pulsos de ultrassom como a excitação codificada e as formas de onda arbitrárias.
- Uso de transdutores *phased-array* para medição de velocidade.
- Investigação do uso técnica da autocorrelação estendida para melhorar a performance computacional de técnicas que utilizam de correlação cruzada como por exemplo, o PIV.

7.2.2 Medição multifásica

- Uso de mais transdutores para medição mais detalhada do escoamento.
- Uso de transdutores de diferentes frequências e diâmetros para identificação e separação das velocidades das bolhas e das partículas.
- Medição combinada de técnicas diferentes para medição da velocidade no escoamento multifásico.
 - Medição Doppler no mesmo local com múltiplos transdutores para melhorar os valores médios.
 - Correlação cruzada entre dois sensores subsequentes medir a velocidade da bolha alongada.
- Combinação do ultrassom com métodos de medição de fração de vazio para obter a medição multifásica do escoamento.

REFERÊNCIAS

- ABBON AS. *Multiphase Flowmeter*. . [S.l.]: US20110259120. , 2011
- ABDA, F. *et al.* Ultrasonic device for real-time sewage velocity and suspended particles concentration measurements. *Water Science and Technology*, v. 60, n. 1, p. 117–125, 2009.
- ACCUFLOW. *SR & LT Series*. Disponível em: <http://www.accuflow.com/wp-content/uploads/2012/05/Brochure_SR.pdf>. Acesso em: 19 set. 2014.
- ADRIAN, R. J. Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, v. 39, n. 2, p. 159–169, 6 jul. 2005. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00348-005-0991-7>>. Acesso em: 17 set. 2013.
- AGARCORP. *MPFM- 50 SERIES Multiphase Flow Meter (Oil/Water/Gas)*. Disponível em: <<http://www.agarcorp.com/Product/MPFM50Detail.html>>. Acesso em: 19 set. 2014.
- AGARCORP. *Multi-phase fluid measurement apparatus and method*. . [S.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US8521436>>. , 2013
- ARITOMI, M. *et al.* Measurement System of Bubbly Flow Using Ultrasonic Velocity Profile Monitor and Video Data Processing Unit. *Journal of Nuclear Science and Technology*, v. 33, n. 12, p. 915–923, 1996a.
- ARITOMI, M. *et al.* Measurement System of Bubbly Flow Using Ultrasonic Velocity Profile Monitor and Video Data Processing Unit. *Journal of Nuclear Science and Technology*, v. 33, n. 12, p. 915–923, 1996b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/18811248.1996.9732033>>.
- ARROYO, P.; GREATER, C. A. Stereoscopic particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, v. 2, p. 1181–1186, 1991.
- ARTIUM TECHNOLOGIES. *Phase Doppler Interferometer*. Disponível em: <http://www.artium.com/cgi-bin/DJgal_getfile.cgi?F=DOCS/00010.pdf>. Acesso em: 19 set. 2016.
- AZZOPARDI, B. J. *Gás-Liquid Flows*. New York: Beggel House Inc, 2006.
- BAKER, D. W. Pulsed Ultrasonic Doppler Blood-Flow Sensing. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, v. 17, p. 170–185, 1970.
- BENDAT, J. S.; PIERSOL, A. G. *Engineering applications of correlation and spectral analysis*. [S.l.]: Wiley, 1980. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=DckYAQAIAAJ>>.
- BIRKHOFFER, B. H. *et al.* Monitoring of fat crystallization process using UVP – PD technique. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 19, p. 163–169, 2008.
- BJAERUM, S.; TORP, H.; KRISTOFFERSEN, K. Clutter filter design for ultrasound color flow imaging. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, v. 49, n. 2, p. 204–16, fev. 2002. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11885678>>.
- BONNEFOUS, O.; PESQUE, P. Time domain formulation of pulse-Doppler ultrasound and blood velocity estimation by cross correlation. *Ultrasonic Imaging*, v. 8, n. 2, p. 73–85, 1986.
- BRATLAND, O. *Pipe Flow 2 : Multi-phase Flow Assurance*. [S.l: s.n.], 2013. Disponível em: <<http://www.drbratland.com/>>.

- BRUNN, P. O.; MÜLLER, M.; HARDER, C. New Rheometric Technique: The Gradient-Ultrasound Pulse Doppler Method. *Appl. Rheol.*, v. 7, p. 204, 1997.
- BRUUN, H. H. *Hot-wire Anemometry: Principles and Signal Analysis*. [S.l.]: Oxford University Press, 1995a. Disponível em: <<https://books.google.ca/books?id=PkAnIqXGkY0C>>. (Oxford science publications).
- BRUUN, H. H. *Hot-wire Anemometry: Principles and Signal Analysis*. [S.l.]: Oxford University Press, 1995b. (Oxford science publications).
- CARVALHO, R. D. M. *et al.* Application of the ultrasonic technique and high-speed filming for the study of the structure of air–water bubbly flows. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 33, n. 7, p. 1065–1086, out. 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177709000843>>.
- CHRISTENSEN, D. *Ultrasonic Bioinstrumentation*. New York: Wiley, 1988. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=wHtrAAAAMAAJ>>.
- CHUANG, P. Y. *et al.* Airborne Phase Doppler Interferometry for Cloud Microphysical Measurements. *Aerosol Science and Technology*, v. 42, n. September, p. 685–703, 2008. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02786820802232956>>.
- COUTINHO, F. R. *et al.* A New Method for Ultrasound Detection of Interfacial Position in Gas-Liquid Two-Phase Flow. *Sensors*, v. 14, p. 9093–9116, 2014.
- CROWE, C. T. *Multiphase flow handbook*. 1. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. v. 9.
- CZARSKE, J. W. Laser Doppler velocimetry using powerful solid-state light sources. *Measurement Science and Technology*, v. 17, n. 7, p. R71–R91, 2006.
- DA SILVA, M. J. *et al.* High-resolution gas–oil two-phase flow visualization with a capacitance wire-mesh sensor. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 21, n. 3, p. 191–197, set. 2010. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095559861000004X>>. Acesso em: 4 set. 2010.
- DA SILVA, M. J.; HAMPEL, U. Capacitance wire-mesh sensor applied for the visualization of three-phase gas–liquid–liquid flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 34, p. 113–117, dez. 2013. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955598613001131>>. Acesso em: 25 jun. 2014.
- DUKHIN, A. S.; GOETZ, P. J. *Characterization of Liquids, Nano-and Microparticulates, and Porous Bodies using Ultrasound*. 2. ed. [S.l.]: Elsevier, 2002.
- DURST, F. *Principles and practice of laser-Doppler anemometry*. 1. ed. [S.l.]: Academic Press, 1976.
- DURST, F.; ZARÉ, M. Laser Doppler Measurements in Two-Phase Flows. 1975, Copenhagen: [s.n.], 1975. p. 403–429.
- ECKERT, S.; WILLERS, B.; GERBETH, G. Measurements of the Bulk Velocity during Solidification of Metallic Alloys. v. 36, n. January, p. 267–270, 2005.
- ELSINGA, G. E. *et al.* Tomographic particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, v. 41, n. 6, p. 933–947, 2006.
- EMERSON/ROXAR. *The Roxar Multiphase Meter*. Disponível em: <[http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM Roxar Documents/Flow Metering/Roxar Multiphase meter 2600 Brochure.pdf](http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Roxar%20Documents/Flow%20Metering/Roxar%20Multiphase%20meter%202600%20Brochure.pdf)>. Acesso em: 8 ago. 2014.
- EMERSONPROCESS. *Medidor Micro Motion Coriolis*. Disponível em: <http://www3.emersonprocess.com/micromotion/tutor/portuguese/46_densityoptubefreq.html>

>. Acesso em: 2 jul. 2014.

EXPROGROUP. *Well Testing*. Disponível em: <[http://www.exprogroup.com/products-and-services/well-testing/extended-well-testing-\(ewt\)/](http://www.exprogroup.com/products-and-services/well-testing/extended-well-testing-(ewt)/)>. Acesso em: 20 jul. 2014.

EXPROMETER. *Sonar Technology*. Disponível em: <http://www.exprometers.com/SONAR_Technology/Flow_Mechanics/>. Acesso em: 19 set. 2014.

FALCONE, G.; HARRISON, B. *Forecast expects continued multiphase flowmeter growth*. Disponível em: <<http://www.ogj.com/articles/print/volume-109/issue-10/drilling-production/forecast-expects-continued-multiphase-flowmeter-growth.html>>. Acesso em: 19 set. 2014.

FALCONE, G.; HEWITT, G.; ALIMONTI, C. *Multiphase Flow Metering*. 1. ed. [S.l.]: Elsevier, 2009.

FISHER, M. J.; DAVIES, P. O. A. L. Correlation measurements in a non-frozen pattern of turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 18, n. 1, p. 97–116, 1964. Disponível em: <http://journals.cambridge.org/article_S0022112064000076>.

FMC/MPM. *MPM*. Disponível em: <<http://www.mpm-no.com/mpmproducts/>>. Acesso em: 19 set. 2014.

FOX, T. F. A theoretical and experimental investigation of a range-gated ultrasonic Doppler flow detector. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, v. 14, n. 3, p. 330, 1981. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0022-3735/14/i=3/a=016>>.

FRANKLIN, D. L.; SCHLEGEL, W.; RUSHMER, R. F. Blood Flow Measured by Doppler Frequency Shift of Back-Scattered Ultrasound. *Science*, 10.1126/science.134.3478.564, v. 134, n. 3478, p. 564–565, 25 ago. 1961. Disponível em: <<http://www.sciencemag.org/content/134/3478/564.abstract>>.

FRØYSTEIN, T.; KVANDAL, H.; AAKRE, H. Dual energy gamma tomography system for high pressure multiphase flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 16, n. 2–3, p. 99–112, abr. 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598605000178>>. Acesso em: 16 jun. 2014.

GONÇALVES, J. LUÍS. *Desenvolvimento de uma Técnica Ultrassônica para Medição da Concentração das Fases Dispersas em Escoamentos Multifásicos Representativos da Indústria de Petróleo e Gás Natural*. 2013. UNIFEI, 2013.

GONZALEZ, R. *et al.* Development of a multiphase flow meter by means of multiple ultrasonic velocity profile measurements. *6th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering*, p. 61–64, 2008. Disponível em: <http://www.isud-conference.org/ISUD-06/ISUD_6_proceedings.pdf>.

GRANGEIRO, F. *Caracterização do escoamento intermitente horizontal água-ar através de ultrassom auxiliado por filmagem ultrarrápida*. *Caracterização do escoamento intermitente horizontal água-ar através de ultrassom auxiliado por filmagem ultrarrápida*. 2010. Unicamp, 2010.

HAIMO. *MPFM*. Disponível em: <http://www.haimo.com.cn/english/cp_list.aspx?treeid=384&fatherid=354>. Acesso em: 8 ago. 2014.

HASSAN, Y. A.; SCHMIDL, W.; ORTIZ-VILLAFUERTE, J. Investigation of three-dimensional two-phase flow structure in a bubbly pipe flow * . *Measurement Science and*

Technology, v. 9, p. 309–326, 1998.

HISCH, K. D. Holographic particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, v. 13, p. R61–R72, 2002.

HOEKS, A. P. G. *et al.* An efficient algorithm to remove low frequency Doppler signals in digital Doppler systems. *Ultrasonic Imaging*, v. 13, n. 2, p. 135–144, 1991. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0161734691900802>>.

HOLLEMAN, I.; BEEKHUIS, J. Analysis and correction of dual-PRF velocity data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 20, n. 1996, p. 443–453, 2003.

HURTHUR, D.; LEMMIN, U. A constant-beam-width transducer for 3D acoustic Doppler profile measurements in open-channel flows. *Measurement Science and Technology*, v. 9, n. 10, p. 1706–1714, 1998.

HURTHUR, D.; LEMMIN, U. A correction method for turbulence measurements with a 3D acoustic doppler velocity profiler. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 18, n. 3, p. 446–458, 2001.

JENSEN, J. A. *Estimation of Blood Velocities Using Ultrasound: A Signal Processing Approach*. 2. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2006.

JENSEN, J. I. A. Implementation of Ultrasound Time-Domain Cross-Correlation Blood Velocity Estimators. v. 40, n. 5, 1993.

JISKOOT. *Mixmeter Multiphase Meter*. Disponível em: <<http://www.jiskoot.com/download.php?id=38>>. Acesso em: 8 set. 2014.

JONES, O. C.; DELHAYE, J. M. Transient and statistical measurement techniques for two-phase flows: a critical review*. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 3, p. 89–116, 1976.

KASAI, C. *et al.* Real-Time Two-Dimensional Blood Flow Imaging Using an Autocorrelation Technique. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, p. 458–464, 1985.

KESKIN, C.; ZHANG, H.-Q.; SARICA, C. *Identification and Classification of New Three-Phase Gas/Oil/Water Flow Patterns*. . [S.l.]: Society of Petroleum Engineers. , 2007

KINSLER, L. E.; FREY, A. R. *Fundamentals of Acoustics*. [S.l.]: J. Wiley & Sons, 1962. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=N9kNAQAIAAJ>>.

LA VISION. *FlowMaster*. Disponível em: <<http://www.lavision.de/en/download.php?id=317>>. Acesso em: 19 set. 2016.

LAI, X.; TORP, H.; KRISTOFFERSEN, K. An Extended Autocorrelation Method for Estimation of Blood Velocity. v. 44, n. 6, p. 1332–1342, 1997.

LEMMIN, U.; ROLLAND, T. Acoustic Velocity Profiler for Laboratory and Field Studies. *Journal of Hydraulic Engineering*, n. December, p. 1089–1098, 1997.

LUBBERS, J.; GRAAFF, R. A simple and accurate formula for the sound velocity in water. *Ultrasound in Medicine and Biology*, v. 24, n. 7, p. 1065–1068, mar. 1998. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20407896>>.

MASSIGNAN, J. P. D. Métodos de Análise de Sinais de Ultrassom para Caracterização de Escoamentos bifásicos. *Dissertação de Mestrado*, 2009.

MEDENG. *Catálogo Medeng*. Disponível em: <http://www.epc-china.com/web_en/OGS/MD_Flow_meters.jsp>. Acesso em: 14 jul. 2014.

MEDENG. *Multiphase flowmeter using a combination of pressure differentials and*

ultrasound doppler readings. . [S.l: s.n.]. , 2011

MINAGAWA, H. *et al.* Measurement of Averaged Liquid Velocity Field around Large Bubbles Rising in Stagnant Water in Round Pipe Using UVP. *JSME International Journal Series B*, v. 49, n. 4, p. 1173–1180, 2006. Disponível em: <<http://joi.jlc.jst.go.jp/JST.JSTAGE/jsmeb/49.1173?from=CrossRef>>.

MURAI, Y. *et al.* Development of an ultrasonic void fraction profiler. *Measurement Science and Technology*, v. 20, n. 11, p. 114003, 1 nov. 2009. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0957-0233/20/i=11/a=114003?key=crossref.43c967643a92bec7043bfd15e5284a17>>. Acesso em: 8 maio 2013.

MURAI, Y. *et al.* Ultrasonic detection of moving interfaces in gas–liquid two-phase flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 21, n. 3, p. 356–366, set. 2010. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095559861000052X>>. Acesso em: 2 nov. 2011.

MURAI, Y. *et al.* UVP Measurement of a Turbulent Channel Flow Containing Large Bubbles. p. 43–46, 2006.

MURAI, Y.; TASAKA, Y.; TAKEDA, Y. Time-Resolved Flowmetering of Gas-Liquid Two-Phase Pipe Flow by Ultrasound Pulse Doppler Method. 2011, Tianjin: [s.n.], 2011. p. 516–523.

MURAKAWA, H.; KIKURA, H.; ARITOMI, M. APPLICATION OF MULTI-WAVE TDX FOR MULTI-PHASE. p. 111–114, 2004.

MURAKAWA, H.; KIKURA, H.; ARITOMI, M. Application of ultrasonic doppler method for bubbly flow measurement using two ultrasonic frequencies. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 29, n. 7, p. 843–850, ago. 2005. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177705000282>>.

MURAKAWA, H.; KIKURA, H.; ARITOMI, M. Application of ultrasonic doppler method for bubbly ow measurement using two ultrasonic frequencies. *Most*, v. 29, p. 843–850, 2005.

MURAKAWA, H.; KIKURA, H.; ARITOMI, M. Application of ultrasonic multi-wave method for two-phase bubbly and slug flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 19, n. 3–4, p. 205–213, jun. 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955598607000465>>. Acesso em: 11 jul. 2014.

MURAMATSU, E. *et al.* Multi-wave ultrasonic Doppler method for measuring high flow-rates using staggered pulse intervals. *Measurement Science and Technology*, v. 27, n. 2, p. 25303, 2016. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0957-0233/27/i=2/a=025303?key=crossref.1c47231cebd5088b19d7354e1737a0cc>>.

NAKORYAKOV, V. E. *et al.* Gas-liquid bubbly flow in vertical pipes. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, v. 118, n. 2, p. 377–382, 1996. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0030173832&partnerID=40&md5=2307724ee6f206dee202cc022e42aaa2>>.

NEFTEMETER. *A clamp on multiphase meter for cost effective well monitoring*. Disponível em: <<http://www.neftemer.com/downloads/neftemer-presentation-tog-2008.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2014.

NGUYEN, T. T. *et al.* Ultrasonic Doppler Velocity Profile Measurement of Single- and Two-Phase Flows Using Spike Excitation. *Experimental Techniques*, p. n/a-n/a, 2015. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/ext.12165>>.

OBAYASHI, H. *et al.* Velocity vector profile measurement using multiple ultrasonic

transducers. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. i, p. 189–195, 2008.

OFUCHI, C. Y. *et al.* A Flexible Ultrasonic Velocity Profiler Development Environment. *International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, n. 2, p. 1562–1566, 2014.

OFUCHI, C. Y. TÉCNICAS AVANÇADAS PARA ANÁLISE DE ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO EM GOLFADAS. *Dissertação de Mestrado*. [S.l.]: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2011. .

OLYMPUS. *Ultrasound Transducers Technical Notes*. Disponível em: <<https://www.olympus-ims.com/data/File/panametrics/UT-technotes.en.pdf>>. Acesso em: 21 jul. 2014a.

OLYMPUS. *Ultrasound Tutorial*. Disponível em: <<http://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/instrumentation/intro/>>. Acesso em: 25 jul. 2014b.

OPPEMHEIM, A. V.; SCHAFFER, R. V. *Discrete-Time Signal Processing*. 3. ed. [S.l.]: Pearson, 1989.

OURIEV, B. *et al.* Industrial application of ultrasound based in-line rheometry : Visualization of steady shear pipe flow of chocolate suspension in pre-crystallization process Industrial application of ultrasound based in-line rheometry : Visualization of steady shear pipe. *Review of Scientific Instruments*, v. 74, n. 12, 2003.

PETROLEUM SOFTWARE. *ESMER*. Disponível em: <http://www.petroleumsoftware.co.uk/ESMER_brochure_PSL.pdf>. Acesso em: 19 set. 2014.

PIETROFIORNTINI. *Device for the measurement of electrical properties of fluids and method for measuring said electrical properties*. . [S.l.]: Google Patents. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US20120182030?hl=pt-BR&cl=en>>. , 2012

PIETROFIORNTINI. *Multiphase flowmeter Catalog*. Disponível em: <http://www.fiorentini.com/media/files/995_flowatch_2014_lr.pdf>. Acesso em: 19 set. 2014.

PORTALMARÍTIMO. *Campo de Jubarte*. Disponível em: <<http://portalmaritimo.com/2010/10/05/sbm-e-petrobras---la-vem-a-p-57/>>. Acesso em: 20 jul. 2014.

PRASSER, H. A new electrode-mesh tomograph for gas–liquid flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 9, n. 2, p. 111–119, jun. 1998. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955598698000156>>.

SATOMURA, S. Ultrasonic Doppler Method for the Inspection of Cardiac Functions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 29, n. 11, 1957.

SCHLAIKJER, M. *Development and characterization of algorithms for estimation of blood velocity with ultrasound*. 2001. Technicak University of Denmark, 2001.

SCHLUMBERGER. *Phase Watcher*. Disponível em: <http://www.slb.com/~media/Files/testing/product_sheets/multiphase/phasewatcher_sagd_ps.pdf>. Acesso em: 19 set. 2014a.

SCHLUMBERGER. *Well Test Separator*. Disponível em: <http://www.slb.com/services/characterization/testing/surface_testing/exploration_appraisal/surface_testing_equipment/separation/cleansep_well_test_separator.aspx>. Acesso em: 20 jul. 2014b.

- SHOHAM, O. *Mechanistic modeling of gas-Liquid Two-phases Flow in Pipes*. [S.l.]: Society of Petroleum Engineers, 2006.
- SHUNG, K. K. *Diagnostic Ultrasound: Imaging and Blood Flow Measurements*. [S.l.]: Taylor & Francis, 2005. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=oA8vOfIYArMC>>.
- SILIXA. *Distributed Flow Profiling*. Disponível em: <<http://www.silixa.com/energy/distributed-flow-profiling/>>. Acesso em: 19 set. 2014.
- SIRMANS, D.; ZMIC, D.; BUMGARNER, B. Extension of maximum unambiguous Doppler velocity by use of two sampling rates. 1976, Seattle: [s.n.], 1976. p. 23–28.
- SMOLYAKOV, A. V.; TKACHENKO, V. M. *The Measurement of Turbulent Fluctuations*. [S.l.: s.n.], 1983. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-642-81983-4>>.
- SONG, Q. *et al.* Phase distributions for upward laminar dilute bubbly flows with non-uniform bubble sizes in a vertical pipe. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 27, n. 2, p. 379–390, 2001.
- SPINELLI, G. NOVAS TECNOLOGIAS EM PRODUÇÃO DE PETRÓLEO. 2006, [S.l.: s.n.], 2006. Disponível em: <http://www.sbpcnet.org.br/livro/58ra/atividades/TEXTOS/texto_892.html>.
- SU, Z.; YE, L.; LU, Y. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review. *Journal of Sound and Vibration*, v. 295, n. 3–5, p. 753–780, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X0600109X>>.
- TAKEDA. Measurement of Velocity Profile of Mercury Flow by Ultrasound Doppler Shift Method. *Nuclear Technology*, v. 79, n. 1, p. 120–124, 1987.
- TAKEDA, Y. Development of an ultrasound velocity profile monitor. *Nuclear Engineering and Design*, v. 126, n. 2, p. 277–284, 1991. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002954939190117Z>>.
- TAKEDA, Y. *Ultrasonic Doppler Velocity Profiler for Fluid Flow*. 1. ed. Tokyo: Springer Tokyo, 2012.
- TAKEDA, Y. Velocity profile measurement by ultrasound Doppler shift method. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 7, n. 4, p. 313–318, dez. 1986. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0142727X86900111>>.
- TAKEDA, Y.; MURAI, Y.; TASAKA, Y. *Ultrasonic multiphase flowmeter, ultrasonic multiphase flow rate measurement program, and multiphase flow rate measurement method using ultrasonic wave*. . [S.l.]: Google Patents. Disponível em: <<http://www.google.com/patents/US20100268486>>. , 2010
- TELETRONIC ROSSENDORF. *Wire Mesh System WMS 200*. Disponível em: <<http://www.teletronic.net/>>. Acesso em: 8 set. 2014.
- TENIOU, S.; MERIBOUT, M. Multiphase Flow Meters Principles and Applications : A Review. v. 2, n. 8, p. 290–293, 2011.
- TEZUKA, K. *et al.* Ultrasonic pulse-Doppler flow meter application for hydraulic power plants. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 19, p. 155–162, 2008.
- THORN, R.; JOHANSEN, G. A; HJERTAKER, B. T. Three-phase flow measurement in the petroleum industry. *Measurement Science and Technology*, v. 24, n. 1, p. 12003, 1 jan. 2013. Disponível em: <

0233/24/i=1/a=012003?key=crossref.d7827d2ffdc264a4604b597d0c786c09>. Acesso em: 27 maio 2014.

TORP, H.; KRISTOFFERSEN, K. Velocity Matched Spectrum Analysis: A new Method for suppressing velocity ambiguity in pulsed-wave doppler. *Ultrasound in medicine & biology*, v. 21, n. 7, p. 937–944, 1995.

TORP, H.; LAI, X. M.; KRISTOFFERSEN, K. Comparison between cross-correlation and auto-correlation technique in color flow imaging. *Ultrasonics Symposium, 1993. Proceedings., IEEE 1993*, p. 1039–1042 vol.2, 1993.

TSI. *TSI Thermal Anemometry Probes*. Disponível em: <http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Catalogs/Hotwire_Catalog_2980465.pdf>. Acesso em: 20 set. 2016.

VIOLA, F.; WALKER, W. F. A comparison of the performance of time-delay estimators in medical ultrasound. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, v. 50, n. 4, p. 392–401, 2003.

WADA, S.; KIKURA, H.; ARITOMI, M. Pattern recognition and signal processing of ultrasonic echo signal on two-phase flow. *Flow Measurement and In*, v. strumentat, p. 207–224, 2006.

WEATHERFORD. *Alpha VRSD Multiphase Flowmeter*. Disponível em: <<http://www.weatherford.com/Products/Production/FlowMeasurement/AlphaVSRDMultiphaseFlowmeter/index.htm>>. Acesso em: 19 set. 2014a.

WEATHERFORD. *Red Eye Multiphase Metering System*. Disponível em: <<http://www.weatherford.com/Products/Production/FlowMeasurement/RedEyeMultiphaseMeteringSystem/>>. Acesso em: 19 set. 2014b.

WEE, A.; FARESTVEDT, L.; PHASE, M. A Combined Multiphase and Wetgas Meter with In-Situ Sampling of Fluid Properties Significance of Subject Matter. 2011, [S.l.: s.n.], 2011.

WESTERWHEEL, J.; ELSINGA, G. E.; ADRIAN, R. J. Particle Image Velocimetry for Complex and Turbulent Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 45, n. 1, p. 409–436, 2013. Disponível em: <<http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-fluid-120710-101204>>.

WIKLUND, J.; RAHMAN, M.; HÅKANSSON, U. In-line Rheometry of Micro Cement Based Grouts – A Promising New Industrial Application of the Ultrasound Based UVP + PD Method. *Applied Rheology*, v. 22, n. 4, p. 1–11, 2012.

WILSON, L. S. Description of broad-band pulsed doppler ultrasound processing using two-dimensional fourier transform. *Ultrasonic Imaging*, v. 13, p. 301–315, 1991.

WOO, J. *A short History of the development of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*. Disponível em: <<http://www.ob-ultrasound.net/history1.html>>. Acesso em: 7 jul. 2014.

XIE, C.; WU, Z. Microwave Doppler system for multiphase flow measurement. 2011, Tianjin: [s.n.], 2011. p. 1428.

YAN, W. *Sand Transport in Multiphase Pipelines*. 2010. Cranfield university, 2010.

YANAGISAWA, T. *et al.* Detailed investigation of thermal convection in a liquid metal under a horizontal magnetic field: Suppression of oscillatory flow observed by velocity profiles. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, v. 82, n. 5, p. 1–9, 2010.

YEH, Y.; CUMMINS, H. Z. Localized fluid flow measurements with an HeNe laser

spectrometer. *Applied Physics Letters*, v. 4, n. 10, p. 176–178, 1964.

ZEDEL, L.; HAY, A. E. Resolving velocity ambiguity in multifrequency, pulse-to-pulse coherent doppler sonar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 35, n. 4, p. 847–851, 2010.

APÊNDICE A

A. LISTA DE PUBLICAÇÕES

A.1 LISTA DE PUBLICAÇÕES CONTIDAS NESTE TRABALHO

OFUCHI, C. Y.; COUTINHO, F. R.; RASIA, R. S.; ARRUDA, L. V. R.; NEVES, F. JR; MORALES, R.E.M. A Flexible Ultrasonic Velocity Profiler Developing Environment. **In: Proceedings of the 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (IM2CT)**, 2014 may 12-15, Montevideo, Uruguay.

OFUCHI, C. Y.; COUTINHO, F. R.; NEVES, F. JR; ARRUDA, L. V. R.; MORALES, R.E.M. Extended Autocorrelation Velocity Estimator Applied to Fluid Engineering. **In: Proceedings of the 9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering**, 2014 august 27-29, Strasbourg, France.

OFUCHI, C. Y.; COUTINHO, F. R.; NEVES, F. JR; ARRUDA, L. V. R.; MORALES, R.E.M. Evaluation of an Extended Autocorrelation Phase Estimator for Ultrasonic Velocity Profiles Using Nondestructive. **Sensors**, 2016, v. 16, 1250.

A.2 LISTA DE PUBLICAÇÕES NÃO RELACIONADAS DIRETAMENTE

COUTINHO, F. R.; OFUCHI, C. Y.; NEVES, F. JR; MORALES, R.E.M. Técnica Ultrassônica de Doppler Pulsado para Determinar a Velocidade das Fases em um Escoamento Bifásico Gás-Líquido de Bolhas Dispersas. **In: 3^o Encontro Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e Escoamentos Multifásicos**, 2012 Maio 07-08, Curitiba, Brasil.

COUTINHO, F. R.; OFUCHI, C. Y.; ARRUDA, L. V. R.; NEVES, F. JR; MORALES, R.E.M. A New Method for Ultrasound Detection of Interfacial Position in Gas-Liquid Two-Phase Flow. **Sensors**, 2014, v. 14, n. 5, p. 9093-9116

COUTINHO, F. R.; OFUCHI, C. Y.; ARRUDA, L. V. R.; NEVES, F. JR; MORALES, R.E.M. Accuracy evaluation of a crossed beam double element transducer for ultrasound velocity profiler application. **In: Proceedings of the 9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering**, 2014 august 27-29 , Strasbourg, France. **Aceito.**

A.3 ORIENTAÇÕES DE TRABALHOS

SBARDELOTTO, G.; BAGIO, M. A.; BOSTELMANN, P.; Medição de velocidade por ultrassom doppler para fluidos multifásicos. **Trabalho de Conclusão de Curso**, UTFPR, Curitiba, Brasil.

A.4 PREMIAÇÕES

Student Best Paper Award em **9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering**, 2014 august 27-29 , Strasbourg, France.

APÊNDICE B

B. FUNDAMENTOS DE ULTRASSOM

B.1 HISTÓRICO

O texto a seguir é baseado no histórico do ultrassom aplicado a área médica de Woo (2014).

Os primeiros estudos sobre ultrassom foram realizados em 1794 quando o biólogo italiano Lazzaro Spallanzani descobriu a habilidade dos morcegos de se localizarem no escuro utilizando a reflexão de ondas de alta frequência inaudíveis para o ser humano. Em 1826 o físico suíço Jean Daniel Colladon utilizou sinos submersos no lago Genebra para determinar a velocidade do som na água.

Uma grande revolução ocorreu em 1880 quando os físicos e irmãos Jacques e Pierre Curie observaram que um potencial elétrico poderia ser produzido quando pressão mecânica era aplicada sobre um cristal de quartzo. Surgiu então o efeito piezoelétrico, termo composto do grego (piezein) que significa pressão junto a eletricidade, que caracteriza a produção de energia elétrica devido a compressão sobre determinados materiais. A partir desse momento era possível gerar e receber sinais de ultrassom.

Outro grande marco na história do ultrassom ocorreu em 1912 logo após o Titanic afundar. O acidente motivou pesquisas na área até que em 1915 o físico Paul Langevin inventou o primeiro transdutor de ultrassom, um hidrofone para detectar icebergs. Entre 1915 e 1918 o equipamento evoluiu para ser usado como ferramenta militar, na detecção de submarinos durante a Primeira Guerra Mundial. Nos anos posteriores foi desenvolvido o SONAR (*Sound Navigation and Ranging*) para equipar navios de guerra.

Um equipamento também desenvolvido no período de guerra, entre 1924 e 1939 foi o RADAR (*Radio Detection and Ranging*). A tecnologia empregada nos radares, descrita em livros como “*Principles of Radar*” publicado pela Massachusetts Institute of Technology (MIT) em 1944, foi precursora dos equipamentos médicos e sonares 2D que surgiram posteriormente.

Outro importante avanço de grande importância para o ultrassom que ocorreu na mesma época foi a invenção dos detectores de falhas em peças metálicas, particularmente importantes na época para verificar a integridade de cascos de navio e tanques de guerra. A ideia foi primeiramente sugerida em 1928, pelo cientista soviético Sergei Y Sokolov que utilizou a técnica ultrassônica de atenuação para detectar falhas em metais. Com avanços da tecnologia

nos anos 40 foi possível gerar pulsos de curta duração, possibilitando a técnica de ultrassom por reflexão utilizada até hoje.

Após a Segunda Guerra Mundial, utilizando todo o conhecimento do RADAR, SONAR e do detector de falhas, o ultrassom também passou a ser utilizado em na área médica para fins de diagnóstico com imagens bidimensionais em escalas de cinza.

Com a evolução da eletrônica surgiram novos equipamentos, que proporcionaram um grande aumento nas pesquisas com ultrassom a partir dos anos 60. Em meados dos anos 80 surgem os equipamentos para medição de vazão por ultrassom na indústria.

B.2 CONCEITOS BÁSICOS

O termo “ultrassom” é utilizado para referenciar as ondas mecânicas que se propagam a uma frequência acima do espectro audível pelo ser humano que é de 20 kHz. Por ser uma onda mecânica o ultrassom necessita de um meio físico em que as partículas vibrem para se propagar. Essa vibração pode ocorrer de várias formas que podem ser classificadas em modos de propagação. As duas formas mais comuns de propagação são o modo longitudinal e o transversal.

As ondas longitudinais, também chamadas de ondas de compressão, são caracterizadas pela vibração das partículas no mesmo sentido de sua trajetória, como mostra a Figura B.1(a). Na figura é possível observar a presença de ondas de compressão e dilatação criadas pela passagem do ultrassom.

As ondas que se propagam de forma transversal, também chamadas de ondas de cisalhamento, fazem com que as partículas vibrem na direção perpendicular a direção de propagação da onda, como mostra a Figura B.1(b).

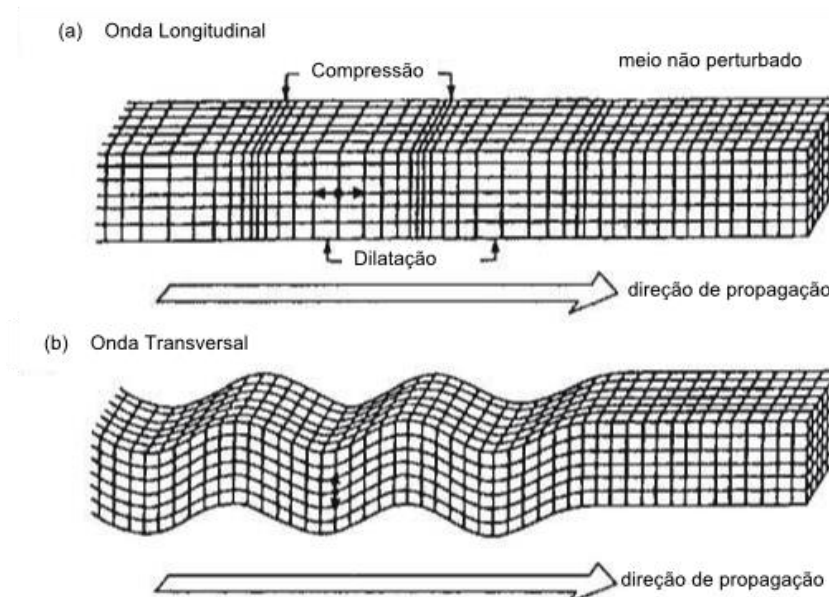


Figura B.1. Deslocamento das partículas do meio devido a uma perturbação acústica relativo a um determinado instante de tempo. (a) Onda Longitudinal. (b) Onda Transversal.

Existem também as ondas que se propagam superficialmente, também chamadas de ondas superficiais ou de Rayleigh, e as ondas de Lamb e Love que se propagam em materiais sólidos com interfaces livres (chapas, placas, etc.), com espessura de poucos comprimentos de onda. Esses modos de propagação não serão discutidos neste documento, mas são amplamente utilizadas na área de ensaios não destrutivos. Mais detalhes podem ser encontrados em Su (2006).

O movimento da onda acústica é descrito pela Equação (B.1), mostrada em Christensen (1988), como função da pressão acústica p pela posição na direção z e pelo tempo t . A equação é derivada da Segunda lei de Newton combinada com a Lei da conservação de Massa aplicada a um determinado volume de material com densidade ρ_0 e fator de compressibilidade K

$$\frac{\partial^2 p(z, t)}{\partial z^2} - \rho_0 K \frac{\partial^2 p(z, t)}{\partial t^2} = 0. \quad (\text{B.1})$$

A equação diferencial da onda tem como uma de suas soluções a seguir:

$$p = p_+ \cos(\omega t - kz) \quad (\text{B.2})$$

onde :

p_+ : constante de amplitude

ω : frequência angular da onda em radianos/segundo

k : constante de propagação

Christensen (1988) mostra que a partir da Equação (B.2) surgem alguns conceitos importantes como o comprimento de onda λ , a velocidade angular ω , a frequência temporal f e a velocidade da frente de onda c . Essas definições são relacionados de acordo com as seguintes equações:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{B.3})$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (\text{B.4})$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{B.5})$$

$$c = \frac{\omega}{k} \quad (\text{B.6})$$

A velocidade da onda é relacionada às propriedades do meio a partir da Equação (B.7) derivada da Equação (B.6)

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho_0 K}} \quad (\text{B.7})$$

onde:

ρ_0 : densidade média do material em kg/m^3

K : fator de compressibilidade em m^2/N

A temperatura média também é um dos fatores que influencia as propriedades do material e conseqüentemente a velocidade da onda. Quanto maior a temperatura, maior a velocidade do som no meio. A relação não é necessariamente linear, mas no caso da água por exemplo, Lubbers e Graaf (1998) conseguiram definir uma equação para temperaturas T no intervalo de 15 a 35 graus Celsius.

$$c = 1404,3 + 4,7T - 0,04T^2 \quad (\text{B.8})$$

Outro conceito importante em acústica diz respeito a dificuldade de uma onda induzida por uma pressão a uma determinada velocidade atravessar um meio. Essa relação é chamada de impedância acústica e é descrita pelas Equações (B.9) e (B.10):

$$Z = \frac{p}{u} \quad (\text{B.9})$$

$$Z = \rho_0 c \quad (\text{B.10})$$

onde:

p : pressão acústica em kg/ms (Pascal)

u : velocidade local da partícula em m/s

Z : Impedância acústica em $N \cdot s \cdot m^{-3}$ (Rayl)

ρ_0 : densidade do meio kg/m^3

c : velocidade do som no meio em m/s

A Tabela B.1 mostra as propriedades acústicas de diversos materiais.

Tabela B.1. Propriedades acústicas de alguns materiais (OLYMPUS, 2014a)

Material/ Substância	Densidade (kg/m ³)	Velocidade Longitudinal (m/s)	Impedância (MRayls)
Acrílico	1179	2730	3,22
Alumínio	2699	6320	17,06
Nylon	1192	2600	3,1
Ouro	19321	3240	62,6
Ferro	7700	5900	45,43
Parafina	1533	1500	2,3
Glicerina (25°C)	1229	1904	2,34
Óleo SAE20	868	1740	1,51
Água (25°C)	998	1496,7	1,494
Ar	1294	331,14	0,4286
CO ₂ (0°C)	1977	259	0,512
CO (0°C)	1251	338	0,423

A onda ultrassônica ao transitar de um material para outro de diferente propriedade pode ter parte de sua energia refletida e parte transmitida, podendo ainda sofrer alteração de sua direção de propagação. A Figura B.2 ilustra o comportamento de uma onda plana em uma superfície uniforme.

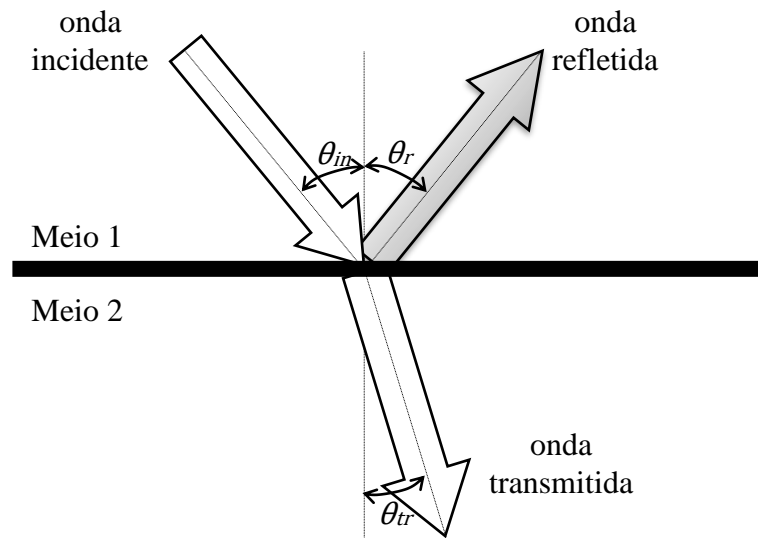


Figura B.2. Comportamento da onda em interfaces

O ângulo de reflexão θ_r é o mesmo que o ângulo de incidência θ_i . O ângulo de transmissão θ_t pode ser determinado pela Lei de Snell (Equação (B.11)).

$$\frac{\text{sen}\theta_{tr}}{\text{sen}\theta_{in}} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (\text{B.11})$$

Para mensurar a magnitude ou a “força” da onda acústica, dois parâmetros são utilizados: pressão (p) e a intensidade acústica (I). A pressão acústica mostra a pressão exercida pela onda sobre uma partícula (N/m^2). A intensidade acústica fornece a potência da onda que se propaga por uma unidade de área (W/m^2). A relação entre as duas grandezas é expressa na Equação (B.12).

$$I = \frac{p^2}{2Z} \quad (\text{B.12})$$

A pressão e a intensidade acústica refletida e transmitida também podem ser mensuradas. Para tanto foram definidos os coeficientes de Reflexão (R e R_I) e Transmissão (T e T_I), medidas em função das impedâncias acústicas do meio, de acordo com as equações B.13 a B.16(KINSLER; FREY, 1962).

$$I = \frac{p^2}{2Z} \quad (\text{B.13})$$

$$I = \frac{p^2}{2Z} \quad (\text{B.14})$$

$$I = \frac{p^2}{2Z} \quad (\text{B.15})$$

$$I = \frac{p^2}{2Z} \quad (\text{B.16})$$

onde:

p_{in} : pressão acústica incidente

p_r : pressão acústica refletida

p_{tr} : pressão acústica transmitida

I_{in} : intensidade acústica incidente

I_r : intensidade acústica refletida

I_{tr} : intensidade acústica transmitida em W/m²

Z_1 : impedância acústica do meio 1

Z_2 : impedância acústica do meio 2

Para o caso em que o ângulo $\theta_i = \theta_r$ as equações mostradas podem ser simplificadas para as Equações (B.17) a (B.20).

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (\text{B.17})$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (\text{B.18})$$

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (\text{B.19})$$

$$T = \frac{4Z_2Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (\text{B.20})$$

É muito comum expressar as medidas acústicas de forma relativa utilizando a unidade logarítmica em decibéis (dB) definida pela Equação B.21.

$$\Delta I(\text{dB}) = 20 \log_{10} \frac{A_1}{A_2} \quad (\text{B.21})$$

onde:

A_1 e A_2 : Intensidade da pressão acústica

ΔI : Diferença entre as intensidades acústicas

A Tabela B.2 mostra algumas relações práticas em dB. A unidade mostra-se especialmente útil para representar comparações de grandes proporções em números modestos. Por exemplo, uma medida duas vezes maior representa 6 dB, enquanto que uma medida 10000 vezes maior representa 80 dB.

Tabela B.2. Relações úteis em decibéis

A1	Razão	dB
A2		
100% 70,71%	1,4142	3
100% 50%	2	6
100% 25%	4	12
100% 10%	10	20
100% 1%	100	40
100% 0,01%	10000	80

As equações e leis apresentadas anteriormente supunham a incidência de uma onda plana em uma interface de diferente impedância acústica perfeitamente plana. Contudo esse tipo de interface não é comumente encontrado na prática.

Quando uma onda ultrassônica atinge uma interface com dimensões similares ou menores que seu comprimento de onda, uma parte da energia desta onda é espalhada em várias direções. O espalhamento (também referenciado usando o termo *scattering*) é o processo fundamental envolvido na medição por ultrassom, pois é devido a ele que é possível o recebimento do eco para aplicar a técnica Doppler.

Como o espalhamento muitas vezes pode resultar de várias fontes de reflexão é comum que ele seja modelado através de métodos estatísticos. É dito que sua amplitude segue uma distribuição Gaussiana e, portanto, ele pode ser totalmente caracterizado pela sua média e variância (JENSEN, J. A., 2006).

B.3 TRANSDUTORES

O transdutor de ultrassom é responsável por converter a energia elétrica em pressão acústica e também o contrário utilizando o efeito piezoelétrico. As características do feixe

ultrassônico como campo acústico, abertura e resolução serão discutidas a seguir. Os detalhes de construção do transdutor não serão apresentados neste trabalho mas podem ser encontrados em Shung (2005).

O campo acústico do transdutor é dividido em duas partes: Campo Próximo (Near Field) e Campo Distante (Far Field). O Campo Próximo é a região mais próxima do transdutor em que existem variações nos valores máximos e mínimos da amplitude da onda até a distância N . O Campo Distante é a área após a distância N em que a pressão acústica decresce gradativamente até zero. A Figura B.3(a) ilustra os campos próximo e distante, enquanto a Figura B.3(b) mostra valores de amplitude para um transdutor de 2,25 MHz. Técnicas que dependem da amplitude do sinal devem operar na região do Campo Próximo onde a amplitude é mais estável.

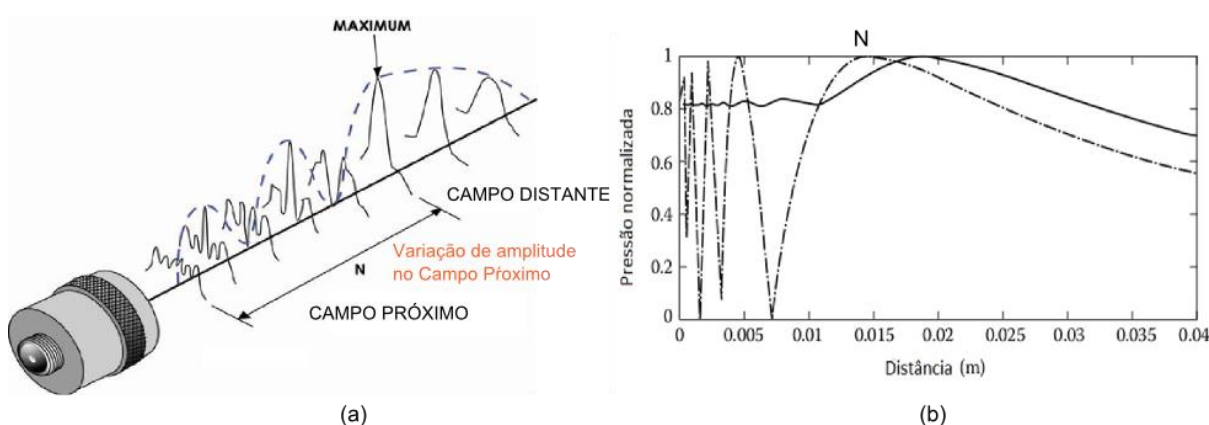


Figura B.3. - Comportamento do campo acústico. (a) Ilustração do Campo Próximo e do Campo Distante. (b) Exemplo de campo acústico de um transdutor de 2,25 MHz.

Fonte:(a) Adaptado de Olympus (2014). (b) Adaptado de Shung (2005)

Para calcular o valor de N a equação (B.22) é utilizada:

$$N = \frac{D^2 f}{4c} = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (\text{B.22})$$

onde:

D : diâmetro ativo do transdutor

f : frequência do transdutor

c : velocidade do som no meio

λ : comprimento de onda

Os feixes ultrassônicos divergem e, portanto, possuem um ângulo de abertura. A Figura B.4 mostra um esquema simplificado do feixe acústico para um transdutor reto. No Campo Próximo o feixe possui uma forma complexa que se estreita. No Campo Distante o feixe diverge (OLYMPUS, 2014a).

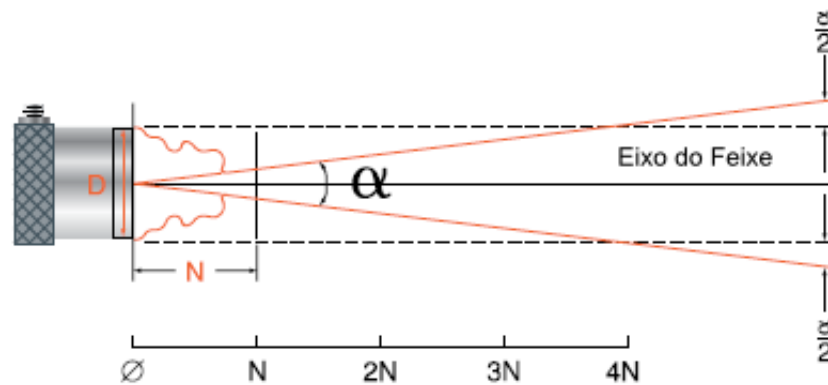


Figura B.4. – Abertura do feixe ultrassônico.

Fonte: Adaptado de Olympus (2014)

O ângulo de abertura do feixe pode ser calculado de acordo com a Equação (B.23) (OLYMPUS, 2014a).

$$\frac{\alpha}{2} = \text{arc sen} \left(0.514 \frac{\lambda}{D} \right) \quad (\text{B.23})$$

onde:

$\alpha/2$: Metade do ângulo de abertura para uma intensidade acústica de -6 dB. Outra característica importante do transdutor é sua resolução espacial, que mostra a capacidade de um instrumento distinguir dois pontos muito próximos. Para o caso de ondas ultrassônicas, essa resolução espacial pode ser na direção axial/longitudinal, paralelo ao feixe, e no sentido transversal/lateral, perpendicular ao feixe. A Figura B.5 mostra um mapeamento da pressão acústica exercida por um transdutor na direção axial e lateral.

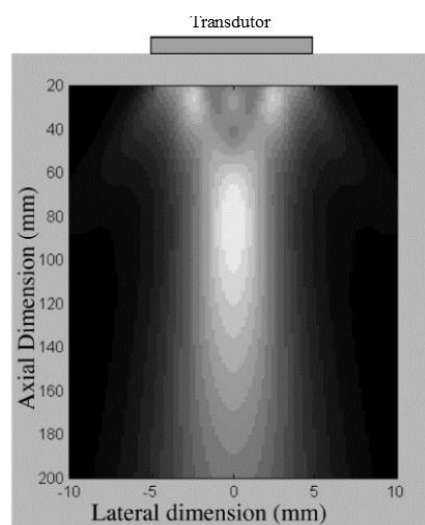


Figura B.5. Definição – Distribuição da amplitude da pressão acústica.

Fonte: Adaptado de Shung (2005).

A resolução axial é definida pela medição do tempo de ida e volta do pulso acústico. Quanto menor a duração do pulso melhor a resolução. A Figura B.6 ilustra as variáveis que influenciam o tempo de duração do pulso como o comprimento de onda e o número de ciclos.

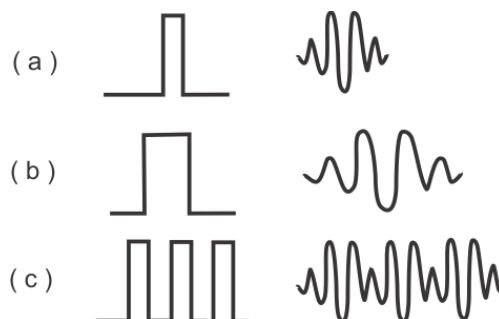


Figura B.6. – Pulsos de ultrassom. (a) pulso de um ciclo. (b) pulso de um ciclo com comprimento de onda maior. (c) pulso de 4 ciclos.

Outro fator que também influencia na duração do pulso são as características construtivas do transdutor como mostra Figura B.7. O transdutor tipo Accuscan possui duração de pulso maior em detrimento a banda de frequência mais estreita, enquanto o transdutor tipo Videoscan possui banda maior e pulso mais estreito. A melhora na resolução espacial tem como consequência a piora no poder de penetração (Shung, 2005), por isso a escolha do transdutor deve levar em conta onde ele será aplicado.

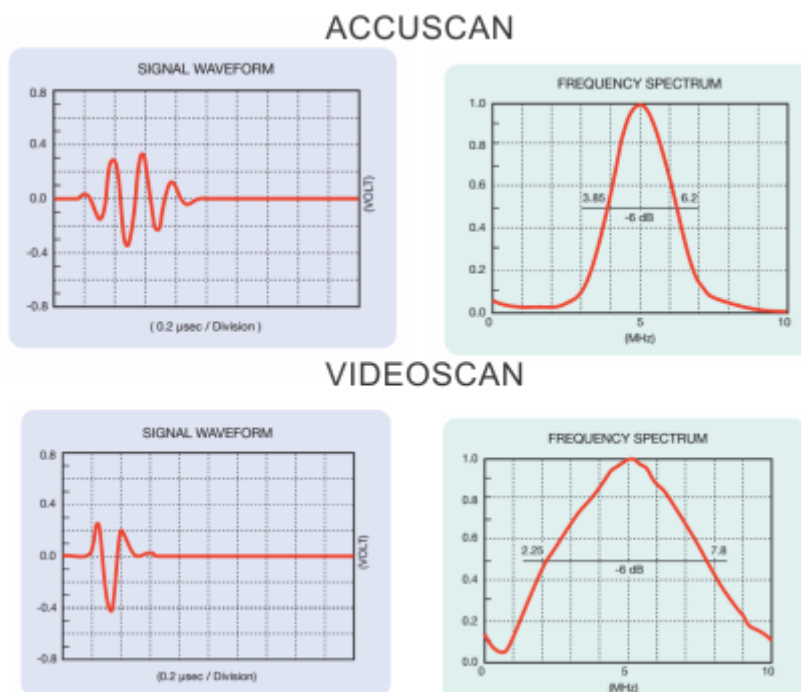


Figura B.7.– Transdutores de banda de frequência diferentes.

Fonte: Adaptado de Olympus (2014)

A resolução axial pode ser calculada pela Equação (B.24) (Christensen, 1988).

$$RA = \frac{t_{pulso}c}{2} = \frac{nciclos\lambda}{2} \quad (\text{B.24})$$

onde:

n : número de ciclos do pulso

λ : comprimento de onda

Além de depender da duração do pulso, a resolução lateral também depende do comportamento do feixe de ultrassom. Em geral, a abertura do feixe faz com que quanto mais distante pior a resolução lateral. Para contornar esse problema podem ser utilizados lentes que melhoram o foco em certas regiões. Mais detalhes podem ser encontrados em Christensen (1988) ou Shung (2005).

APÊNDICE C

C. MEDIDORES MULTIFÁSICOS NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

As principais vantagens do uso de medidores multifásicos estão listadas a seguir.

C.1 APLICAÇÕES DE MEDIDORES MULTIFÁSICOS

Plataformas para perfuração ou produção de petróleo em alto mar (*off-shore*) possuem altíssimos custos de operação. Em operações de teste de poços são necessários separadores dedicados (Figura C.1) que ocupam grandes espaços, são pesados e tem alto custo. MMFs podem substituir esses separadores e assim otimizar o uso do espaço, diminuir a carga nas plataformas e tem um custo menor.

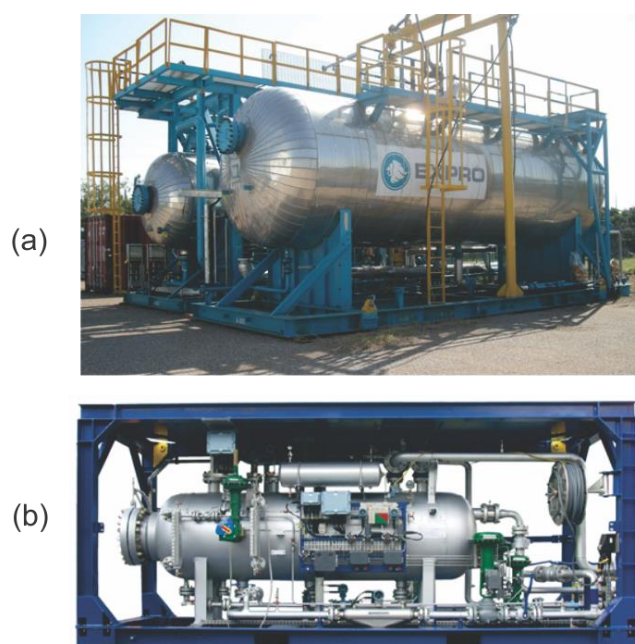


Figura C.1. Separadores de teste

Fonte: a)Exprogroup (2014), b) Schlumberger (2014).

Durante a exploração ou produção de um campo petrolífero podem haver vários poços na mesma localidade como mostra a Figura C.2. Para testar a produção de cada poço (*well-testing*) utilizando separadores de testes convencionais é necessário que sejam instaladas linhas individuais até a superfície. Em muitos casos o custo operacional é inviável para alguns poços. Caso a instalação dessas linhas seja economicamente viável, o processo de separação não pode ser realizado continuamente sendo necessário fechar o poço de tempos em tempos.

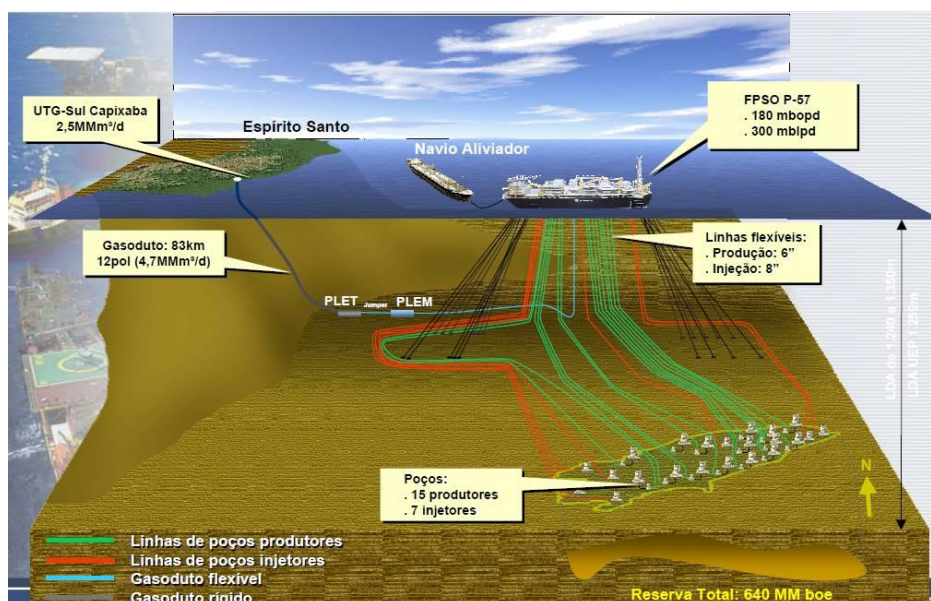


Figura C.2. Operação no Campo de Jubarte conforme planejamento em 2007

Fonte: Portal Marítimo (2010)

A instalação de MMFs submarinos não necessita da construção dessas linhas de fluxo e ainda permite o monitoramento contínuo da produção sem paradas. Desta forma o equipamento pode viabilizar campos economicamente improdutivos. O esquema ilustrado na Figura C.3 mostra o layout para testes de poços utilizando MMFs.

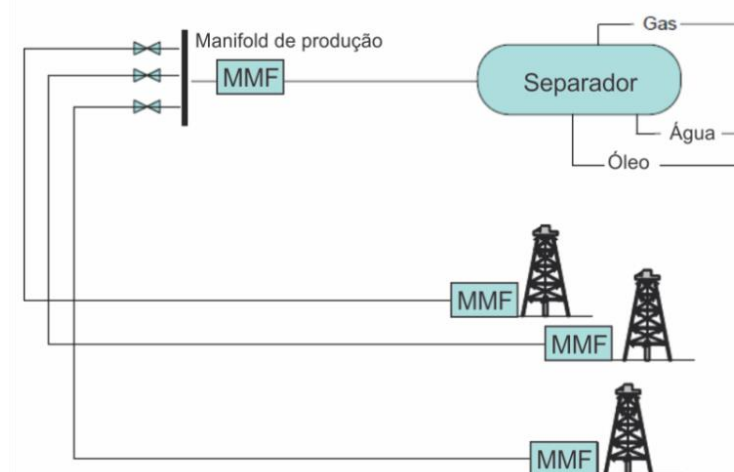


Figura C.3. Layout para testes de poços utilizando MMFs

Fonte: Adaptado de Falcone (2009)

Os MMFs podem ser utilizados em algumas situações onde os diferentes poços/campos pertencem a diferentes operadoras como por exemplo Chevron, Petrobras, Exxon. A produção se mistura em uma única linha para ser transferida até uma unidade de processamento compartilhada (Figura C.4). Essa também é uma forma de viabilizar a exploração de campos improdutivos economicamente.

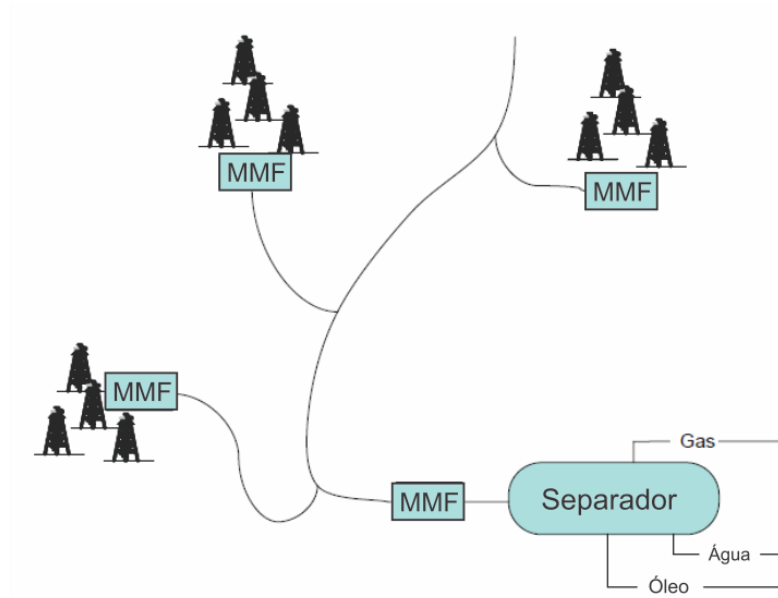


Figura C.4. MMFs aplicado a distribuição da produção

Fonte: Adaptado de Falcone (2009)

O monitoramento contínuo e em tempo real da produção com o uso de MMFs possibilita a otimização da produção. Operadores na área de elevação artificial podem otimizar parâmetros das bombas centrífugas submersas, dos sistemas de elevação gasosa (*gas lift*) e injeção de diluentes.

C.2 DESCRIÇÃO DE TÉCNICAS E PRINCÍPIOS FÍSICOS DE MEDIDORES MULTIFÁSICOS

O objetivo de um medidor multifásico é determinar a vazão individual de cada fase, ou seja, determinar a densidade ρ , a velocidade v e as frações volumétricas de gás (FVG), óleo (FVO) e água (FVA) como mostra a Figura 5.6.

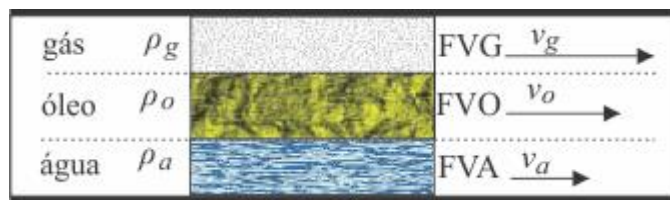


Figura C.5. MMFs aplicado a distribuição da produção

A medição dessas variáveis pode ser realizada direta ou indiretamente de acordo com os as técnicas utilizadas. Em geral pode-se dividir os sensores em três categorias, os que medem a fração/característica da fase, velocidade das fases e a quantidade de movimento.

C.2.1 MEDIÇÃO DA FRAÇÃO DE FASE

a) Atenuação de raios Gama

A medição da atenuação dos raios γ é também chamado de densitometria Gama, pois o coeficiente de atenuação é aproximadamente proporcional a densidade média alcançada pelo feixe. Diferentes níveis de energia podem ser utilizados com o uso de diferentes fontes radioativas. Medidores com uma única fonte são utilizados para medir a fração de gás do escoamento, devido a atenuação no gás ser muito diferente comparada à atenuação no líquido. No caso de escoamentos com mais de um componente na fase líquida (água e óleo), é preciso mais uma fonte de energia para compensar a medição (FRØYSTEIN; KVANDAL; AAKRE, 2005).

Atualmente é a técnica mais utilizada em MMFs comerciais para medição das frações de fase. Alguns exemplos podem ser encontrados em (EMERSON/ROXAR, 2014; NEFTEMETER, 2014; SCHLUMBERGER, 2014a; WEATHERFORD, 2014a). A técnica já está bem estabelecida e funciona em toda a faixa de fração de vazão e padrões de escoamento. Porém o medidor sofre com problemas de restrição devido a radioatividade.

b) Impedância Elétrica

Técnicas por impedância elétrica utilizam a condutância e/ou a capacitância do meio para se obter as propriedades do meio. São utilizados eletrodos de transmissão e eletrodos de recepção em uma variedade de formatos e posições. É a técnica mais utilizado quando não são utilizadas técnicas radioativas para caracterização das fases do escoamento. A Figura C.6 ilustra a geometria de três MMFs comerciais.

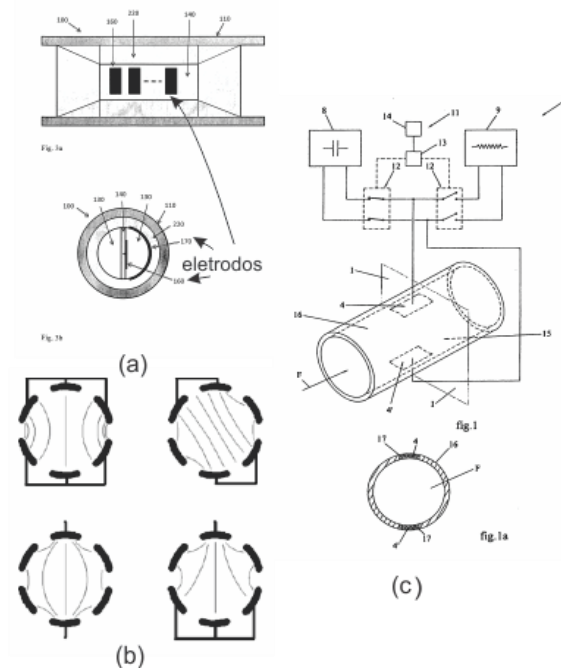


Figura C.6. Diferentes geometrias de eletrodos aplicados a MMFs. (a) Abbcon As (ABBON AS, 2011). (b) Roxar Zector Technology (EMERSON/ROXAR, 2014)(c) Pietro Fiorentini (PIETROFIorentINI, 2012)

Técnicas por impedância elétrica também são amplamente utilizadas na pesquisa de escoamentos multifásicos. O sensor wire-mesh desenvolvido por Prasser(1998) e melhorado por Da Silva *et al.*(2010) pode realizar uma tomografia de um escoamento bifásico gás-líquido e assim medir a fração de vazio e a fração de líquido. Recentemente a técnica também tem evoluído para distinguir água e óleo (DA SILVA, MARCO JOSE; HAMPEL, 2013). O sensor não pode ser aplicado em ambientes hostis por ser intrusivo, porém tem sido de grande utilidade na área acadêmica por ter uma boa resolução espacial e temporal a baixo custo.



Figura C.7. Sensor Wire-Mesh comercializado pela empresa Teletronic GmbH

Fonte:(TELETRONIC ROSSENDORF, 2014)

c) Espectroscopia por infravermelho

A técnica possibilita a medição da fração de água em óleo no escoamento. O princípio utilizado é o da absorção da luz no infravermelho somente pelo óleo e não pela água. A Figura C.8 mostra o sensor comercializado pela Weatherford (2014b). Uma janela de safira é utilizada para que transmissão da luz para o meio em ambientes hostis.



Figura C.8. Sensor de fração de água em óleo da Weatherford Red Eye®

d) Micro-ondas

A fração de água em óleo também pode ser medida por técnicas baseada em micro-ondas. A medição da mudança de amplitude (atenuação) e de fase do sinal aplicado ao escoamento é perceptível principalmente com a passagem de água. Uma característica vantajosa da técnica é a não influência da salinidade na medição. A técnica está presente em alguns medidores como AgarCorp(2014) e FMC/MPM (2014) (este último descrito por Wee e Farestvedt (2011) e ilustrado na Figura C.9).

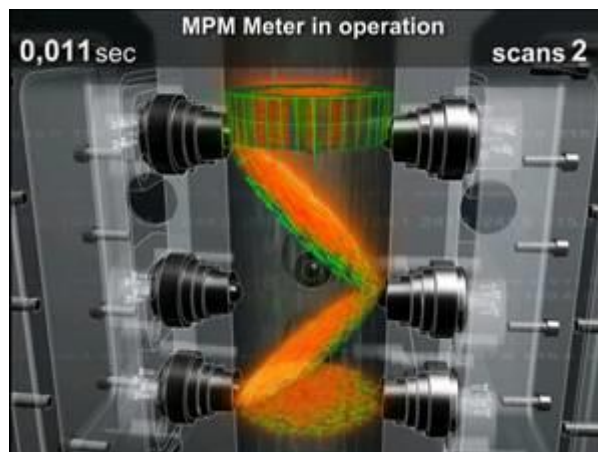


Figura C.9. Medição da fração de fase por espectroscopia de micro-ondas (3D Broadband® da FMC/MPM).

e) Velocidade do som no meio

A velocidade do som no meio muda de acordo com a temperatura, pressão e também densidade do fluido. Desta forma é possível de se obter a fração de água em óleo com o conhecimento a priori dos fluidos do escoamento e suas respectivas tabelas considerando velocidade do som, temperatura e pressão. A técnica pode ser encontrada em medidores descritos em Exprometer (2014) e Silixa (2014).

f) Atenuação acústica

Ondas mecânicas que se propagam pelo líquido são fortemente atenuadas por interfaces com outras fases como gás e sólidos. Esse conceito é utilizado na pesquisa de Carvalho *et al.* (2009) e Massignan (2009), em que a atenuação acústica é relacionada a fração de vazio em um escoamento vertical no padrão de bolhas dispersas.

C.3 CONFIGURAÇÃO DE MEDIDORES MULTIFÁSICOS

Falcone (2009) define que existem quatro maneiras de se combinar os sensores. A primeira diz respeito a homogeneização do escoamento e posterior separação do gás e do líquido. A segunda conta apenas com o homogeneizador do escoamento. A terceira forma é a medição do escoamento não-homogêneo. Por último a separação total das fases em que basta o simples uso de medidores monofásicos convencionais.

C.3.1 ESCOAMENTO HOMOGÊNEO COM SEPARAÇÃO PARCIAL DE FASES

O uso de separadores parciais diminui a complexidade da medição multifásica. O homogeneizador visa retirar a diferença de velocidade (escorregamento) entre as fases, e assim,

utilizar apenas um sensor para medição de mais de uma fase. Uma das configurações possíveis de medidor é ilustrada pela Figura C.11.

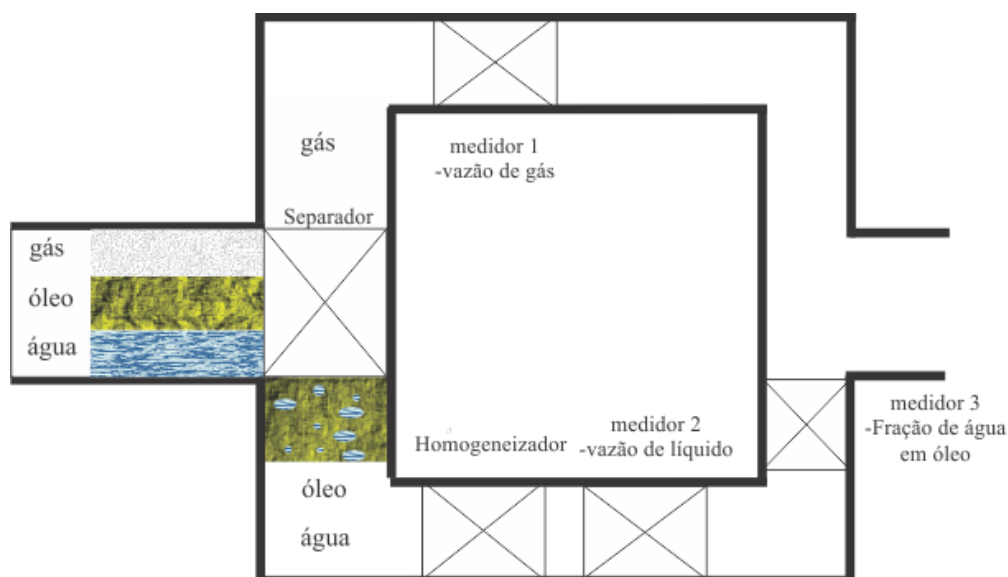


Figura C.10. MMF com separação parcial de fase

Um separador vertical retira o gás do líquido logo na entrada do equipamento. Um medidor monofásico para gás pode ser utilizado nessa configuração. Um homogeneizador é utilizado para a mistura óleo-água. Um medidor de fração de óleo em água e um medidor de vazão para líquido completam a medição multifásica. Alguns medidores comerciais como o da Weatherford (2014b) (Figura C.11), e Accuflow (2014) e Haimo (2014) utilizam esse princípio.

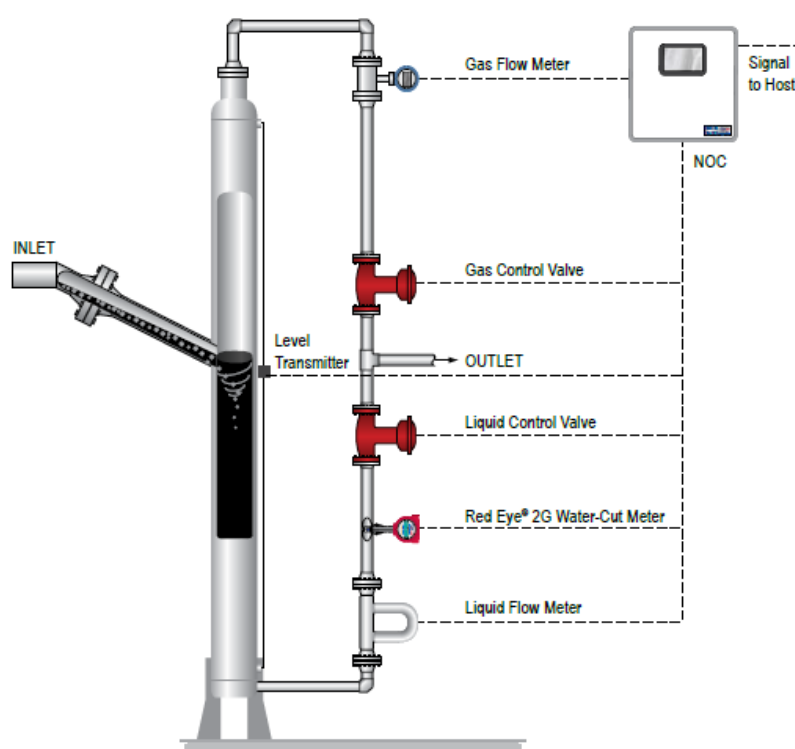


Figura C.11. MMF da (WEATHERFORD, 2014b)

C.3.2 ESCOAMENTO HOMOGÊNEO SEM A SEPARAÇÃO DE FASES

Um dos maiores desafios da medição multifásica está na variedade de padrões de escoamento. O uso de um homogeneizador para definir um único padrão de escoamento simplifica a medição da velocidade (média) e também da densidade (média). No exemplo ilustrado na Figura C.12 um homogeneizador é colocado na entrada do medidor. Os medidores 1 e 2 podem ser, por exemplo, de velocidade média e densidade média. Outras combinações, desde que complementares, de ρ e v podem ser utilizadas. Os medidores 3PM da Abbon AS (2011) e Mixmeter da Jiskoot (Figura C.13) utilizam esse princípio.

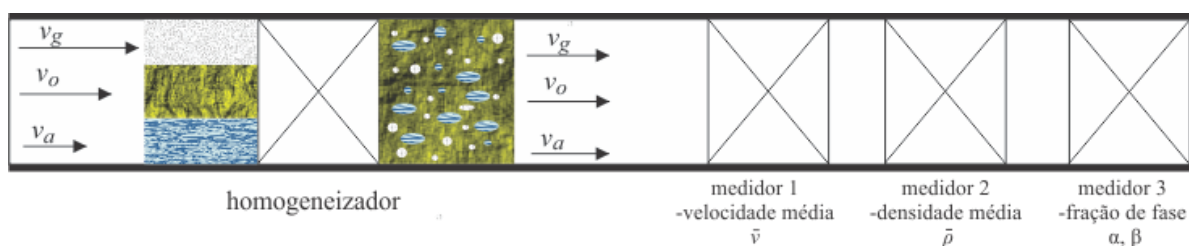


Figura C.12. MMFs em escoamento homogêneo

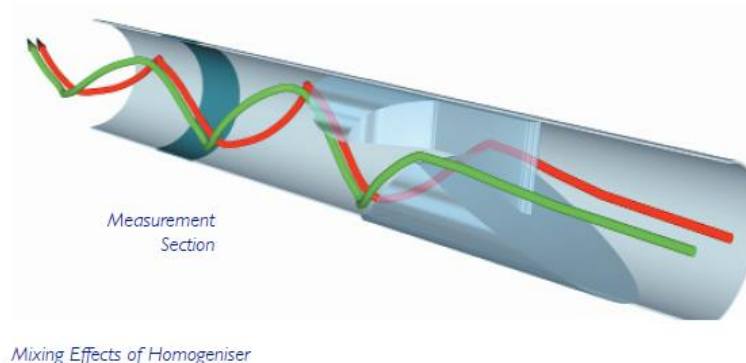


Figura C.13. Homogeneizador do medidor Mixmeter da Jiskoot

Fonte: Jiskoot (2014)

C.3.3 ESCOAMENTO NÃO-HOMOGÊNEO

Nessa configuração o escoamento é mensurado sem qualquer interferência em seu fluxo. É o caso mais complexo em que é necessários ao menos 5 sensores para se determinar 3 velocidades e 2 frações de fase como mostra a Figura C.14.

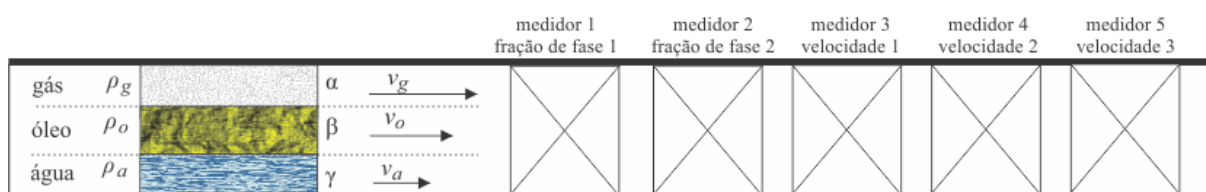


Figura C.14. MMFs aplicado a distribuição da produção

Thorn (2013) comenta que as variáveis necessárias a medição podem ser obtidas direta ou indiretamente. O Medidor da ROXAR modelo 2600 é um exemplo de equipamento que faz a medição diretamente (Figura C.15). A fração das fases é medida por impedância elétrica (capacitância e condutância) e em alguns casos por densitometria Gama. A velocidade da mistura é medida por diferença de pressão no tubo de Venturi e a velocidade do gás por correlação cruzada dos eletrodos.

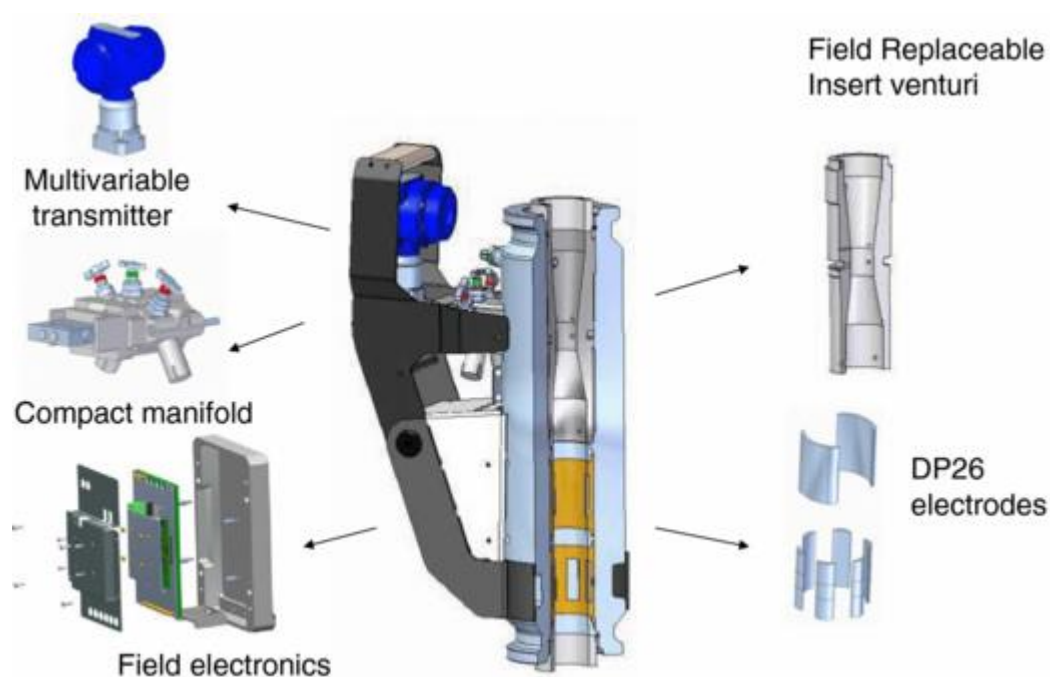


Figura C.15. Medidor Multifásico de medição direta das 3 fases.

Fonte: Roxar (2014)

O medidor ESMER da empresa Petroleum Software utilizada de medidas indiretas para estimar o escoamento trifásico. Uma combinação entre a teoria tradicional de escoamento de fluidos e técnicas avançadas de processamento de sinal e redes neurais é utilizada para medição multifásica. Um carretel com sensor Cone-V é utilizado para medir o diferencial de pressão e também contém um sensor capacitivo/condutoivo. Um medidor Coriolis é utilizado para medir a vazão mássica (corrigido com os dados do medidor Cone-V). Outros medidores como Medeng (2011) e Neftemeter (2014) utilizam a medição indireta com processamento avançado de sinais.

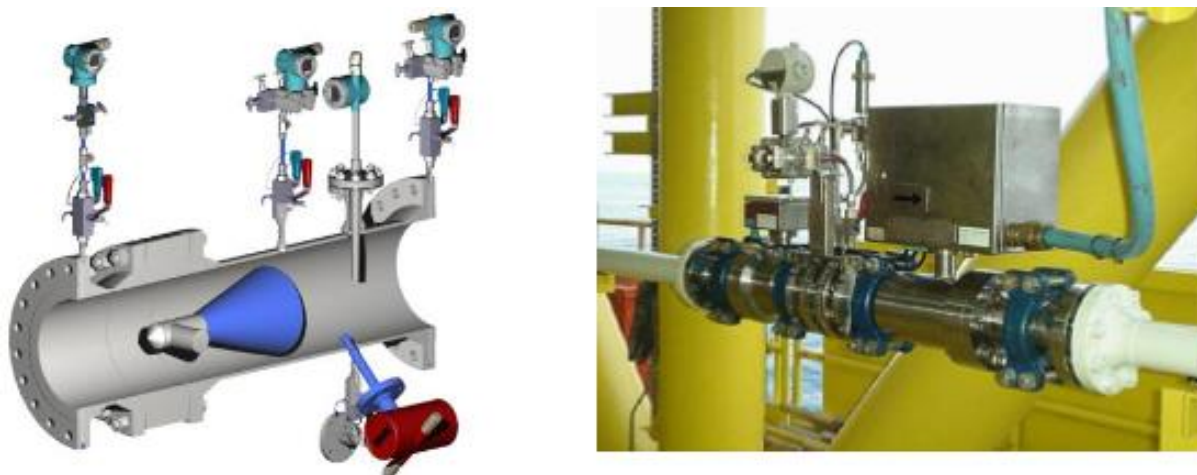


Figura C.16. Medidor Multifásico de medição indireta das 3 fases Esmer.

Fonte: Petroleum Software (2014)

O medidor MD-04 da Medeng utiliza de vários princípios para fazer a medição. A Figura C.17 mostra um desenho 3D do equipamento. O medidor utiliza diferencial de pressão com um tubo de Venturi internamente. Dois conjuntos de sensores ultrassônicos (células Doppler) são utilizados para medir a velocidade da mistura com redundância. Os dados de temperatura e pressão também são medidos. A partir de um conjunto de equações e lógicas uma rede neural a vazão multifásica é obtida como descrito na patente de Medeng (2011).



Figura C.17. Medidor Multifásico da Medeng.

Fonte: Medeng (2014)

C.4 GÁS UMIDO (WET GAS)

Uma das definições encontradas para o escoamento tipo gás úmido é a baixa fração de líquido que pode variar entre 0% a 10% (FALCONE, GIOIA; HEWITT; ALIMONTI, 2009). Dependendo das velocidades do líquido e do gás o padrão de escoamento pode variar entre estratificado, intermitente, anular e anular com pequenas gotas de líquido dentro. A grande maioria dos fabricantes de MMFs utiliza de fontes radioativas ionizantes para conseguir medir corretamente o gás úmido. Pietro Fiorentini (2014) e Emerson/Roxar (2014) por exemplo, comercializam uma versão não radioativa que mede até 97% de fração de gás e outra com densitometria Gama que mede até 100% de gás. Foi encontrado apenas o equipamento MPFM50 da AgarCorp (2014) que afirma medir também o gás úmido sem utilizar de radiação ionizante. As técnicas utilizadas pelo medidor são Coriolis (adaptado a altas frações de gás) e Venturi para medição da velocidade e densidade, micro-ondas para medição da fração de água em óleo e diversos medidores de pressão.

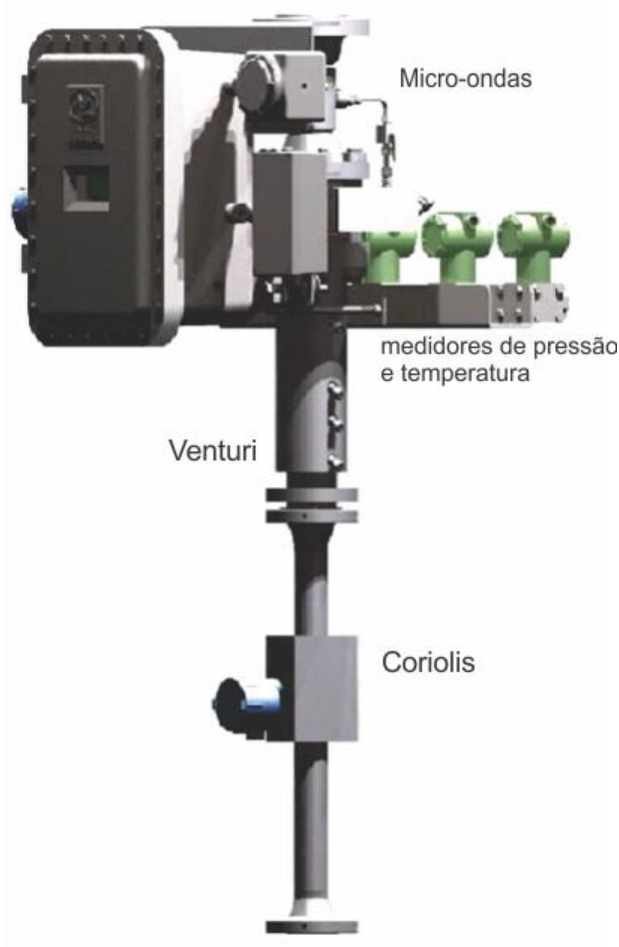


Figura C.18. MPFM50 da AgarCorp.

C.5 RESUMO DOS MEDIDORES COMERCIAIS PESQUISADOS

Muitos autores como Falcone e Harrison (2011), Teniou e Meribout (2011), Gonçalves (2013) e Thorn (2013) já revisaram os diversos medidores comerciais disponíveis na atualidade e seus princípios. A Tabela C.1 mostra alguns MMFs comerciais citados pelos autores mencionados e também neste trabalho. Falcone e Harrison (2011) comentam que o número de empresas que comercializa MMFs fica em torno 20 e o número se estabiliza devido a desistências, aquisições e novas empresas que surgem.

Tabela C.1. MMFs comerciais disponíveis e suas principais técnicas.

Empresa	Modelo	Fração de gás(%)	Fonte radioativa	Acústico/Pressão	Acústico distribuído pelo poço	Impedância Elétrica	Micro-ondas	Venturi/Cone/Diferencial pressão	Correlação Cruzada	Redes Neurais/Fuzzy/Métodos Estatísticos	Infra Vermelho	Homogeneização do fluido	Separação Parcial	Coriolis
Abbon	3PM	0-97												
Accuflow	3P	0-100												
Agar	MPFM-50	0-100												
Ametek/Solartron	Dualstream	>90												
Cameron - Jiskoot	Mixmeter	0-90												
Emerson/Roxar	MPFM2600 gamma	0-100												
Emerson/Roxar	MPFM2600	0-95												
Exprometer/CiDRA	PassiveSONAR	<20												
Exprometer/CiDRA	ActiveSONAR													
FMC/MPM	Dual	0-100												
Haimo		0-100												
Neftemeter														
Petroleum Software	ESMER	0-100												
Pietro Fiorentini	Flowatch HS	0-100												
Pietro Fiorentini	Flowatch 3l	0-97												
Schlumberger	PhaseWatcher	0-100												
Silixa	iDAS													
Weatherford/CiDRA /OptoPlan	Clarion													
Weatherford	Alpha VSRD	0-100												
Weatherford	Red Eye	0-100												
Medeng	Md-04													

A maioria dos medidores faz uso de radiação ionizante como técnica principal de medição da fração de fase. Porém as limitações de uso por restrições de segurança têm aumentado as pesquisas por meios alternativos de medição. Dentre as técnicas não radioativas para medição da fração de fase destacam-se o sensor por micro-ondas, o sensor por absorção da luz no

infravermelho e sensores por impedância elétrica. Para medição da velocidade das fases o diferencial de pressão (tubo de Venturi) e a correlação cruzada de sinais são os métodos mais utilizados. Medições indiretas com processamento avançado de sinais, redes neurais, lógica fuzzy, etc, tem possibilitado o uso de outras técnicas como Coriolis e ultrassom tratado neste trabalho.

APÊNDICE D

D. SOFTWARE PARA MEDIÇÃO DE VELOCIDADE POR IMAGEM

Um software foi desenvolvido para auxiliar a medição da velocidade das partículas e bolhas (Figura D.1). A ideia básica do programa consiste em indicar a posição do objeto (em pixels) em imagens subsequentes para medir a distância percorrida. A velocidade é medida pela distância o intervalo de tempo entre os frames escolhidos. A ferramenta de zoom baseado em uma região de interesse (ROI) é uma das funcionalidades principais do programa. A Figura D.1 e a Figura D.2 mostram a seleção da ROI resultando na imagem com zoom mostrado na Figura D.3 O usuário seleciona o canto superior esquerdo e depois o canto inferior direito para delimitar a imagem. Esse procedimento facilita o acompanhamento de pequenas partículas.

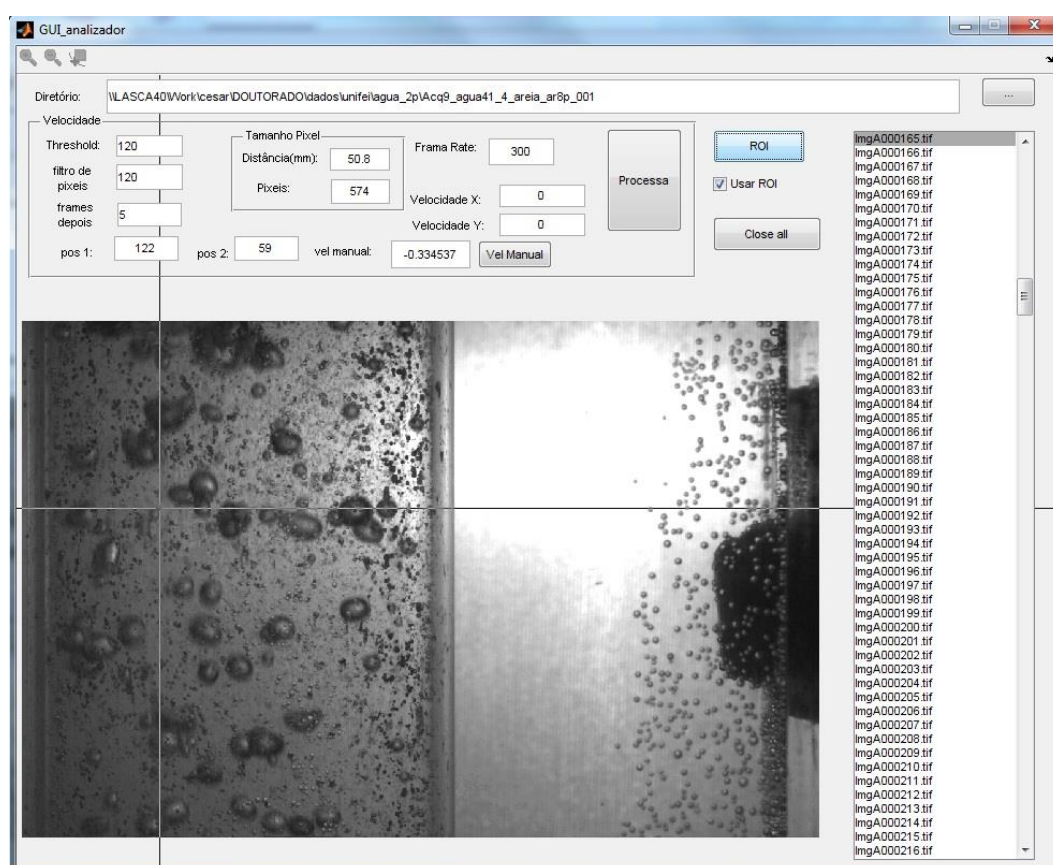


Figura D.1. *Software* para calcular velocidade por imagem (seleção do ponto superior esquerdo)

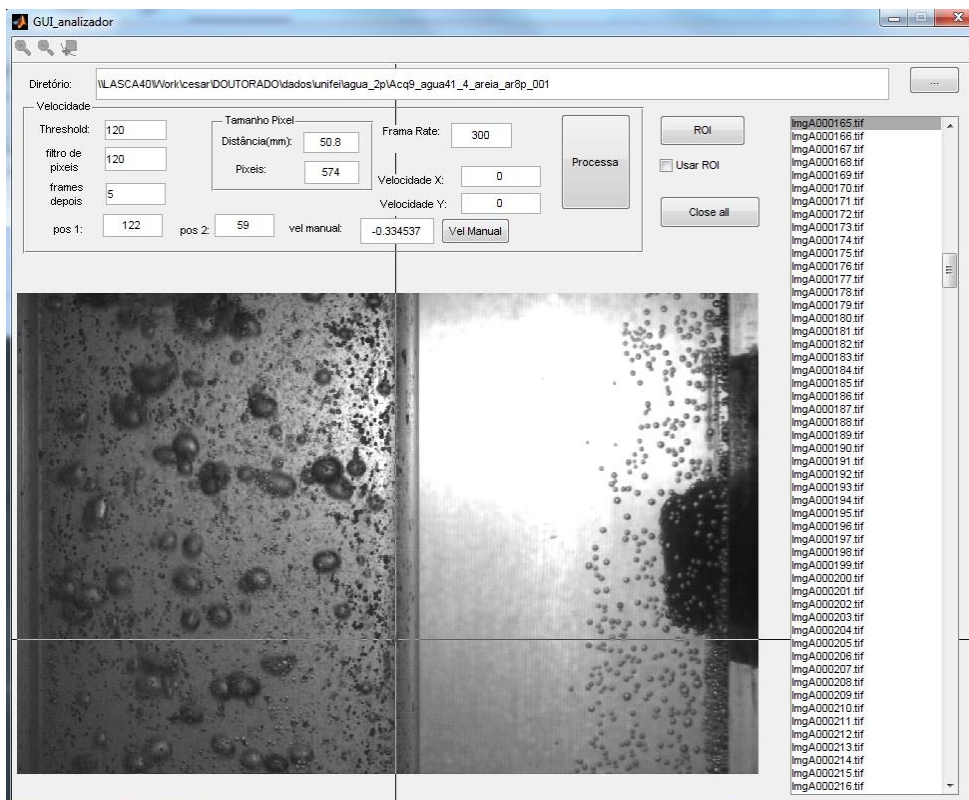


Figura D.2. *Software para calcular velocidade por imagem (seleção do ponto inferior direito)*

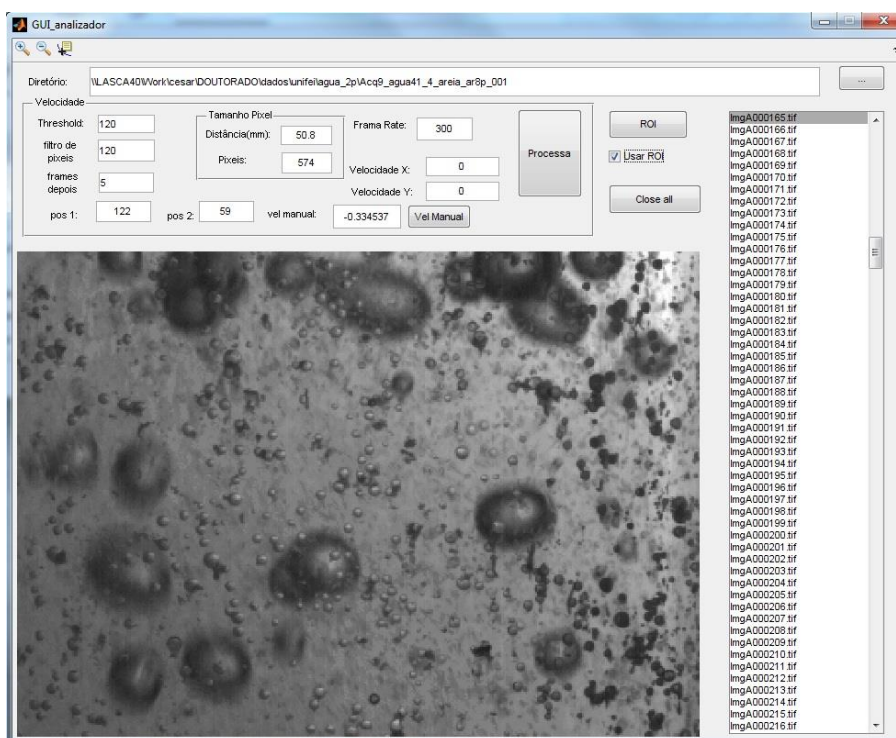


Figura D.3. *Software para calcular velocidade por imagem (ROI selecionada)*

O usuário pode indicar a partícula a ser seguida nos frames subsequentes. Com as informações de frame-rate e tamanho de pixel a velocidade é calculada automaticamente.

APÊNDICE E

E. INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

As tabelas a seguir apresentam os resultados para as incertezas de medição da velocidade no escoamento por câmera de alta velocidade e por ultrassom. A metodologia empregada é mostrada na seção 5.

Tabela E1. Tabela de incertezas para a medição de velocidade por imagem.

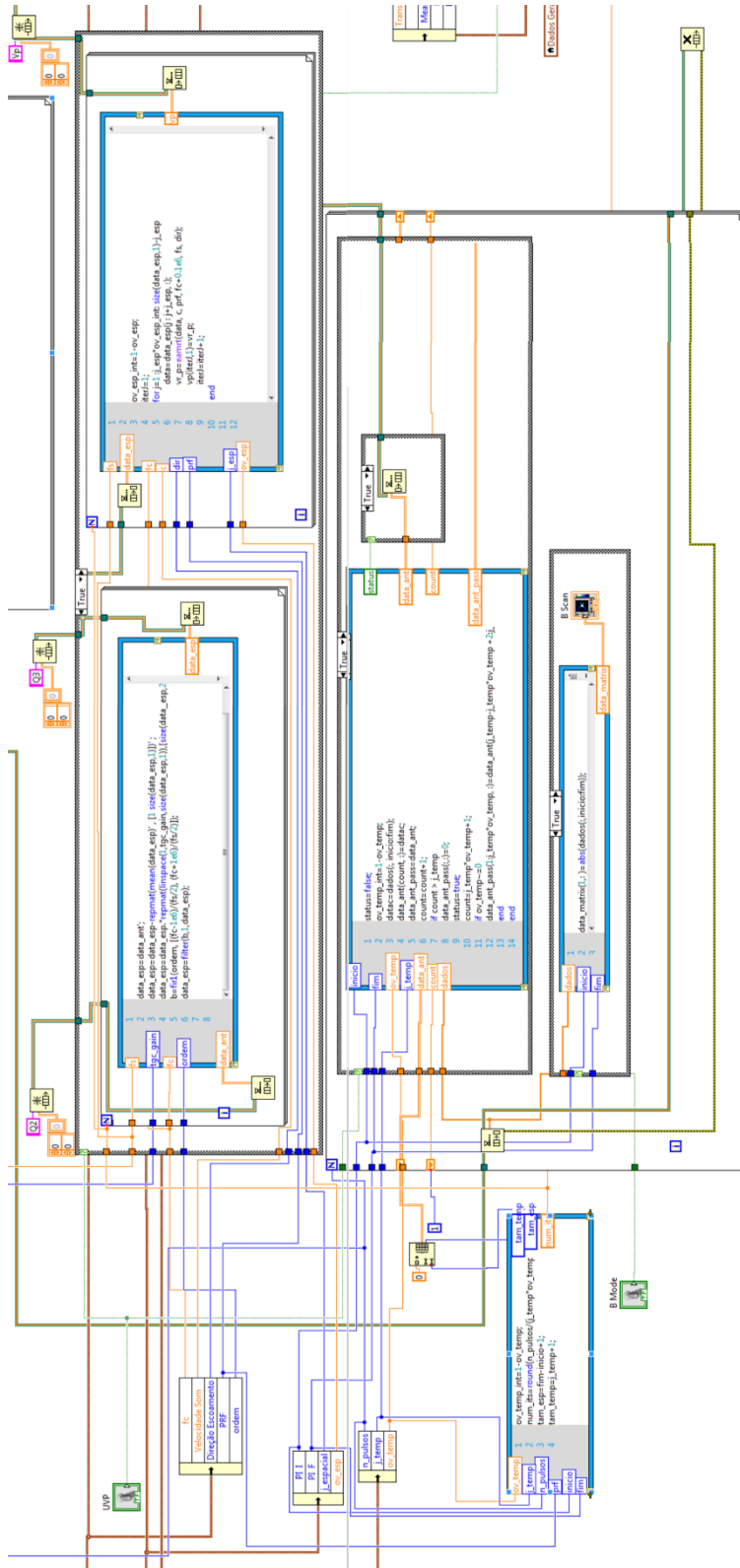
Tipo	Variável	Fonte de Incerteza	Valor	Unidade	Distribuição	Divisor	Variável x	Incerteza padrão u(x)
B	Δt	Velocidade máxima da câmera	5E-04	seg.	Retangular	1,73	$u(\Delta t)$	0,00029
B	dpix	Resolução em pixels	0,5	Pixels	retangular	1,73	$u(dpix)$	0,28868
B	dtubo	Distância Tubulação	0,5	mm	Retangular	1,73	$u(dtubo)$	0,28868
A	Δpix	Medição Experimental	-----	Pixels	Normal	-----	$u(\Delta pix)$	-----

Tabela E2. Tabela de incertezas para a medição de velocidade por ultrassom.

Tip o	Variá v el	Fonte de Incerteza	Incertez a	Unidad e	Distrib uição	Divisor	Variável x	Incerteza padrão u(x)	Valores
B	f0	Frequência central do transdutor	10000	Hz	Retangu lar	1,73	$u(\Delta t)$	5773,50	4000000
B	fprf	Taxa de repetição de pulsos	0,5	Hz	Retangu lar	1,73	$u(dpix)$	0,29	2000
B	θ	Ângulo de medição do transdutor	0,0087	rad	Retangu lar	1,73	$u(dpix)$	0,01	0,26
B	c	Velocidade do som	10	m/s	Retangu lar	1,73	$u(dpix)$	5,77	1492
A	φ	Fase medida	---	rad	normal	---	$u(\Delta pix)$	---	---

APÊNDICE F

F. DIGRAMA EM BLOCOS LABVIEW



APÊNDICE G

G. PSEUDOCÓDIGO PARA OS ESTIMADORES DE VELOCIDADE AVALIADOS

